



**Tiago Vilhena Beirão de Barros Albuquerque**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

# **Estudo do Comportamento de Ancoragens de Pré-esforço por Aderência em Ensaios Monotónicos e Cíclicos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
[Engenharia Civil – Perfil de Estruturas]

Orientador: Doutor Valter José da Guia Lúcio, Professor Associado, FCT/UNL

Co-orientador: Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão, Professora Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutora Maria da Graça Neves

Arguente: Doutor Carlos M. Chastre Rodrigues

Vogal: Doutor Válder J. G. Lúcio

Setembro de 2018



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



**Estudo do comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência em ensaios de monotónicos e cíclicos**

Copyright © Tiago Vilhena Beirão de Barros Albuquerque Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e edito





# Resumo

---

Existem atualmente vários sistemas de pré-esforço, variando estes na forma como a tensão do cordão é transmitida para o betão. Uma técnica recentemente desenvolvida na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, consiste na ancoragem de cordões por aderência.

Esta técnica viabiliza o uso do pré-esforço no reforço de alguns tipos de estruturas de betão armado. A solução de reforço proposta tem a vantagem de não aumentar as dimensões das peças de betão nem inserir componentes externos no elemento estrutural reforçado. Para além disto, o sistema estudado é ativo não só para as cargas aplicadas à estrutura após a aplicação do reforço. É também eficiente para cargas previamente instaladas na estrutura e para deformações e fendilhação causadas pelas ações permanentes.

O trabalho desenvolvido em que se insere esta dissertação aborda a temática da ancoragem por aderência de cordões de pré-esforço de 15,7 mm de diâmetro nominal pré-esforçados com uma força de 100kN em furos de 18 milímetros de diâmetro. Para realizar a ancoragem foi utilizada a resina HIT-RE V5 da Hilti.

Foram realizados ensaios de transferência de pré-esforço (*push-in*) e de arrancamento (*pull-out*) monotónicos com comprimentos de aderência de 400 e 500 milímetros. Para o comprimento de 500 milímetros foram também realizados três ensaios cíclicos com o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização desta técnica no reforço de estruturas sujeitas a ações sísmicas.

Pretende-se que o sistema de aderência apresentado seja utilizado no reforço de diversos elementos de betão armado, nomeadamente no reforço de lajes fungiformes e de vigas para ações sísmicas e para ações gravíticas.

**Palavras-chave:** Aderência; Reforço de Estruturas de betão armado; Ancoragens de Pré-esforço; Ancoragens por aderência; Resinas epoxídicas

---



# Abstract

---

Nowadays, there are several prestressing systems. The major difference between them is in the way the tendon stress is transmitted to the concrete. A recently developed technique at the Faculty of Sciences and Technology of the Universidade NOVA de Lisboa consists of strand anchorage by bonding.

This technique makes possible the use of prestress in the strengthening of some types of concrete structures. The proposed reinforcing solution has the advantage of not increasing the dimensions of the concrete elements nor inserting external components into the strengthened structural element. In addition, the studied system is active not only for the loads applied to the structure after the strengthening, but it is also efficient for loads previously installed in the structure and for deformations and cracking caused by permanent loading.

The work developed in this dissertation deals with the anchorage of prestressed strands with 15.7 mm of nominal diameter by bond, with a prestress loading of 100 kN in holes of 18 millimeters in diameter. Hilti's HIT-RE V5 resin was used for this anchorage.

Monotonic push-in and pull-out tests were performed with embedment lengths of 400 and 500 mm. For the length of 500 mm, three cyclic tests were also carried out to evaluate the feasibility of using this technique in the strengthening of structures to resist to a seismic action.

This adhesion system is intended to be used in the strengthening of several concrete elements, namely fungiform slabs and beams for seismic actions and for gravitational loads.

**Keywords:** Bonding; Strengthening of concrete structures; Prestress anchorages; Anchorages by bonding



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer ao professor Válder José da Guia Lúcio pela sua disponibilidade e pela sua vontade de me integrar neste projeto.

À professora Carla Alexandra da Cruz Marchão por todas as dúvidas que me tirou e pelo acompanhamento que deu no desenvolvimento deste trabalho.

À Helisa Muhaj pelo apoio incansável em todas as questões ligadas aos ensaios laboratoriais.

Ao Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL pelos meios colocados à minha disposição e às funcionárias administrativas Maria da Luz e Carla Teixeira pelo apoio e disponibilidade demonstrados no decorrer da dissertação.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil que contribuíram com a sua experiência e conhecimento para a realização deste trabalho, bem como ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos técnicos do laboratório, José Gaspar e Jorge Silvério pelo apoio prestado durante a realização do programa experimental.

À Hilti Portugal pelo fornecimento das brocas e das resinas necessárias para os ensaios e à VSL pelo fornecimento dos cordões de pré-esforço.

Finalmente, aos meus pais que sempre me apoiaram no meu percurso académico, ao meu irmão que sempre propôs novas abordagens ao meu trabalho e ao Daniel Rodrigues, Igor Varagilal, Ana Breia, Pedro Guerra, João Igreja, Ana Breia, Joana Esteves e Filipa Ramos pela companhia e apoio durante o curso.



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Aspetos Gerais .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização da Tese .....	3
<b>2</b>	<b>ESTADO DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução .....	5
2.2	Aspetos Gerais .....	5
2.3	Materiais.....	8
2.3.1	Resinas Epoxídicas .....	9
2.3.2	Resina vs Calda de cimento.....	9
2.3.3	Aço para pré-esforço.....	10
2.3.4	Betão.....	11
2.4	Ancoragem de pré-esforço por pré-tensão .....	12
2.4.1	Comprimento de transferência (ou de selagem).....	13
2.4.2	Distância mínima entre as armaduras de pré-esforço.....	18
2.4.3	Tensões no betão devido ao pré-esforço.....	19
2.4.4	Influência da velocidade na transferência do pré-esforço.....	21
2.5	Ancoragens com resinas epoxídicas .....	21
2.5.1	Ensaio de arrancamento ( <i>pull-out</i> ).....	21
2.5.2	Ensaio de transferência do pré-esforço ( <i>push-in</i> ) .....	26
2.5.3	Sistema de furação.....	27
2.5.4	Efeito da fendilhação do betão .....	27
2.5.5	Efeito da fadiga .....	28
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
3.1	Introdução .....	29
3.2	Materiais.....	29
3.2.1	Betão armado .....	29
3.2.2	Cordões de pré-esforço.....	31
3.2.3	Resina epoxídica .....	32

3.3	Preparação do ensaio .....	36
3.3.1	Furação do betão .....	36
3.3.2	Montagem e instrumentação do sistema de ensaio.....	37
3.3.3	Preparação do furo e do cordão de pré-esforço.....	40
3.3.4	Sistema de discos para medição do deslizamento do cordão .....	41
3.3.5	Aplicação do pré-esforço .....	42
3.3.6	Preparação e injeção da resina .....	43
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>45</b>
4.1	Introdução .....	45
4.2	Particularidades dos ensaios .....	45
4.3	Ensaio com tubo de vidro .....	47
4.4	Transferência do pré-esforço ( <i>Push-in</i> ) .....	48
4.5	Ensaio de arrancamento ( <i>pull-out</i> ).....	56
4.5.1	Rotura .....	61
4.5.2	Tensão de aderência .....	62
4.6	Ensaio cíclicos.....	64
4.7	Carotes dos furos.....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
5.1	Introdução .....	71
5.2	Conclusões.....	71
5.3	Recomendações futuras .....	72



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicação do sistema de aderência de pré-esforço proposto no reforço de uma viga - trabalho em curso na FCT-UNL no âmbito do doutoramento da Eng <sup>a</sup> Helisa Muhaj .....	3
Figura 2.1 – Primeiras utilizações do conceito de pré-esforço .....	5
Figura 2.2 - Sistemas de ancoragem (adaptado de [3]) .....	6
Figura 2.3 – Modelo de escoras e tirantes na zona de ancoragem do pré-esforço .....	7
Figura 2.4 - Pré-esforço com ancoragem mecânica: desenvolvimento da tensão no betão ao longo do cabo .....	8
Figura 2.5 - Pré-esforço com ancoragem por aderência: desenvolvimento da tensão no betão ao longo do cabo .....	8
Figura 2.6 - Diagrama de tensões-extensões do aço de pré-esforço (adaptado de [17]) ...	11
Figura 2.7 – a) Diagramas de cálculo, idealizados: tensão-deformação de um cordão de pré-esforço genérico; b) tensão-deformação para um cordão de pré-esforço 0,6”S; c) força-deformação para um cordão de pré-esforço 0,6”S .....	11
Figura 2.8 - Distribuição de forças no cordão de pré-esforço no desenvolvimento do comprimento de transferência (adaptado de [22]) .....	13
Figura 2.9 - Desenvolvimento da tensão de aderência ao longo do comprimento de transferência (adaptado de [23]) .....	13
Figura 2.10 – Desenvolvimento da tensão no cordão de pré-esforço e da tensão de aderência ao longo do comprimento de transmissão (adaptado de [24]) .....	14
Figura 2.11 - Efeito de Hoyer (adaptado de [25]) .....	15
Figura 2.12 - Comprimento de transmissão, flexão e amarração (adaptado de [27]) .....	15
Figura 2.13 - Desenvolvimento da tensão de tração de um cordão de pré-esforço ao longo do comprimento de transmissão e do comprimento de flexão (adaptado de [24]) .....	16
Figura 2.14 - Tensão de aderência ao longo do comprimento de flexão .....	16
Figura 2.15 – Relação Tensão-Deslizamento para cordões e para fios de pré-esforço (adaptado de [11]) .....	17
Figura 2.16 - Representação das fendas causadas pela força de corte entre o aço e o betão (adaptado de [32]) .....	18
Figura 2.17 – Relação Tensão-deslizamento com a divisão das tensões em ação mecânica e atrito (adaptado de [29]) .....	18

Figura 2.18 - Espaçamento mínimo para armaduras de pré-esforço individuais (adaptado de [17]) .....	19
Figura 2.19 - Comprimento de regularização ( $L_{disp}$ ) (adaptado de [17]).....	19
Figura 2.20 – Tensões devidas à degradação da força concentrada ou esmagamento do betão, por delaminação e por tração transversal (adaptado de [34]) .....	20
Figura 2.21 - Posição ideal do varão num furo (adaptado de [40]) .....	22
Figura 2.22 - Tipos de rotura na ancoragem de um varão ao betão com resinas ou <i>grout</i> (adaptado de [42]) .....	24
Figura 2.23 - Mecanismos de rotura em função da tensão de rotura e do comprimento de embebimento (adaptado de [40]) .....	25
Figura 2.24 - Perímetro de contacto entre as duas superfícies na ligação do cordão com o elemento reforçado .....	25
Figura 2.25 – Fissuração do betão junto de uma ancoragem .....	28
Figura 3.1 - Prensa Seidner/Walter+Bay 3000D .....	30
Figura 3.2 - Armadura dos blocos de betão armado utilizados para os ensaios de transferência do pré-esforço .....	31
Figura 3.3 - Cordões de pré-esforço utilizados nos ensaios .....	31
Figura 3.4 - Resina HIT-RE 500 V3 utilizada nos ensaios .....	32
Figura 3.5 - Execução dos provetes 40x40x160 de resina HIT-RE500 V3 .....	33
Figura 3.6 – Ensaios para caracterização da resina HIT-RE500 V3.....	33
Figura 3.7 - Gráfico tensão-extensão para os ensaios de flexão aos provetes de resina com 40x40x160 mm <sup>3</sup> .....	34
Figura 3.8 - Gráfico da tensão-extensão para os ensaios de compressão aos provetes de resina 40x40x40 mm <sup>3</sup> .....	35
Figura 3.9 – Bloco de betão utilizado nos ensaios.....	37
Figura 3.10 – a) Esquema do ensaio, em vista, b) em planta .....	38
Figura 3.11 - Unidade de controlo de pressão hidráulica Walter+bai ag .....	39
Figura 3.12 – Vistas gerais do sistema de ensaio.....	40
Figura 3.13 – a) Plasticina no cordão para impedir o fluxo da resina, b) negativo do tubo de injeção no furo, c) fita-cola para limitar o comprimento de aderência, d) fluxo indesejado da resina pelo cordão .....	41
Figura 3.14 - Defletómetros e disco na zona superior do ensaio .....	42
Figura 3.15 – a) Evolução da força ao longo do tempo durante a aplicação do pré-esforço b) pormenor do mesmo gráfico com escala aumentada.....	43

Figura 3.16 – a) furo antes da aplicação do gesso e do betume, b) tampão de betume de pedra e gesso .....	44
Figura 3.17 – a) injeção da resina, b) saída da resina na zona superior do furo .....	44
Figura 4.1 – Ensaio do tubo de vidro .....	48
Figura 4.2 - Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço b) evolução da força medida na extremidade inferior do cordão ao longo da transferência do pré-esforço .....	49
Figura 4.3 – TVM4001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	50
Figura 4.4 – TVM4002 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	50
Figura 4.5 – TVM4003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	51
Figura 4.6 – TVM5001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	51
Figura 4.7 – TVM5002 a) a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	52
Figura 4.8 – TVM5003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	52
Figura 4.9 – TVC5001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas	

extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	53
Figura 4.10 – TVC5002 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	53
Figura 4.11 – TVC5003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço .....	54
Figura 4.12 Comparação das perdas com o trabalho de Faria [15] .....	55
Figura 4.13 – a) Gráficos força-deslocamento para os ensaios monotónicos à rotura, b) escala aumentada .....	57
Figura 4.14 – Ensaio TVM4001, relação força-deslocamento .....	57
Figura 4.15 – Ensaio TVM4002, relação força-deslocamento .....	58
Figura 4.16 – Ensaio TVM4003, relação força-deslocamento .....	58
Figura 4.17 – Ensaio TVM5001, relação força-deslocamento .....	58
Figura 4.18 – Ensaio TVM5002, relação força-deslocamento .....	59
Figura 4.19 – Ensaio TVM5003, relação força-deslocamento .....	59
Figura 4.20 – Ensaio TVC5001, relação força-deslocamento .....	59
Figura 4.21 – Ensaio TVC5002, relação força-deslocamento .....	60
Figura 4.22 – Ensaio TVC5003, relação força-deslocamento .....	60
Figura 4.23 – Relação tensão de aderência-deslocamento em cima para os ensaios de arrancamento monotónicos .....	63
Figura 4.24 – Relação tensão de aderência-deslocamento em baixo para os ensaios de arrancamento monotónicos .....	63
Figura 4.25 - Tensão de aderência-deslocamento do cordão sem alteração da área de contacto .....	64
Figura 4.26 – História de carga imposta no carregamento cíclico do ensaio de arrancamento .....	64
Figura 4.27 – a) TVC5001, força-deslocamento em cima, b) força-deslocamento em baixo .....	65
Figura 4.28 – a) TVC5002, força-deslocamento em cima, b) força-deslocamento em baixo .....	65

Figura 4.29 – a) TVC5003, força-deslocamento em cima, b) força-deslocamento em baixo .....	65
Figura 4.30 - Comparação dos declives em zonas de força nunca antes alcançada e em zonas de forças já alcançadas anteriormente.....	67
Figura 4.31 – Comparação dos declives no início da solicitação e no final dos ciclos, a) TVC5001, b) TVC5003.....	67
Figura 4.32 - Resultado do corte de um carote do furo.....	68
Figura 4.33 – a) Estado da resina no ensaio TVM4001, b) estado da resina no ensaio TVM5001.....	69
Figura 4.34 - Forma da resina após a perda de aderência .....	69



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados médios obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos agentes de aderência por Faria [15]. .....	10
Tabela 2.2 – Dimensões comuns dos diferentes tipos de elementos utilizados para pré-esforço (adaptado de [16]) .....	10
Tabela 2.3 - Resistência ao arrancamento num ensaio de arrancamento com diferentes agentes de aderência e diferentes comprimentos de embebimento [15] .....	26
Tabela 3.1 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cubos .....	30
Tabela 3.2 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cilindros .....	30
Tabela 3.3 - Características do aço utilizado para os ensaios .....	32
Tabela 3.4 - Características dos provetes de resina à flexão .....	34
Tabela 3.5 - Características dos provetes de resina à compressão .....	35
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de transferência de pré-esforço .....	55
Tabela 4.2 - Valores principais dos ensaios de arrancamento .....	61





# Simbologia

## Maiúsculas Latinas

$A_b$	- Área de aderência
$A_{c0}$	- Área de contacto entre a cabeça de ancoragem e o betão
$E$	- Modulo de elasticidade
$E_f$	- Modulo de elasticidade em flexão
$E_{pc}$	- Modulo de elasticidade em compressão
$F_{c1}$	- Força na célula de carga de cima após transferência do pré-esforço
$F_t$	- Força de tração no betão
$F_u$	- Força de rotura ou de cedência
$F_{u2}$	- Força de rotura
$F_{pk}$	Força de rotura
$I$	- Inércia
$L$	- Distancia entre os apoios
$L_b$	- Comprimento de flexão
$L_{bpd}$	- Comprimento de amarração
$L_{disp}$	- Comprimento de regularização
$L_{pt}$	- Comprimento de transmissão
$N$	- Força normal
$N_u$	- Força de rotura ao arrancamento
$P_{el}$	- Força limite de elasticidade
$P_{max}$	- Força máxima
$R_c$	- Resistência à compressão
$R_f$	- Resistência à flexão

## Minúsculas latinas

$a_1$	- Área da secção do elemento de betão
$b$	- largura
$d$	- altura útil da armadura tracionada
$d_{c1}$	- Deslocamento do cordão em cima após perdas
$d_{em}$	- diâmetro do elemento metálico amarrado

$d_g$	- Dimensão máxima do agregado
$d_{max}$	- Flecha máxima no meio vão
$d_u$	- Deslizamento do cordão após rotura ou cedência
$d_{u2}$	- deslocamento do cordão em cima na rotura
$f_b$	- Tensão de cedência
$f_{cc}$	- tensão de plastificação
$f_{cm}$	- Valor medio da tensão de rotura do betão em cilindros (150x300mm <sup>2</sup> )
$f_{p0,1k}$	- Valor característico da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% no aço
$f_{pcc}$	- tensão de cedência à compressão
$f_{pcte}$	- tensão elástica de tração por flexão de rotura
$f_{pcte}$	- tensão de tração por flexão de rotura
$f_{pd}$	- Valor de calculo da tensão de cedência no aço
$f_{pk}$	- Valor característico da tensão de rotura à tração no aço
$f_{ps}$	- Força de pré-esforço
$h$	- altura
$h_{ef}$	- comprimento de selagem

### **Alfabeto Grego**

$\phi$	- Diâmetro
$\epsilon_{uk}$	- Valor característico da extensão máxima no aço
$\sigma$	- Tensão
$\mu$	- Coeficiente de atrito
$\tau$	- Tensão de aderência
$\epsilon_{pct}$	- Extensão de tração por flexão de rotura

### **Abreviaturas utilizadas**

ACI	- American concrete Institute
CC	- Célula de carga
dBaixo	- Deslocamento do cordão na zona inferior da aderência
dCima	- Deslocamento do cordão na zona superior da aderência
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologia
PCI	- Precast Concrete Institute
UNL	- Universidade NOVA de Lisboa

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Aspetos Gerais

O betão armado é utilizado há mais de 100 anos na construção de edifícios e outras estruturas e foi vulgarizado ao longo do século XX passando a ser o material mais utilizado, não só em Portugal, mas também noutros países. Alguns edifícios antigos em betão armado encontram-se bastante degradados. Muitos foram projetados baseados em regras obsoletas que não consideram a ação dos sismos com o devido rigor necessitando, portanto, de ser reforçados. Deste modo, é importante desenvolver técnicas de reforço para estas estruturas, transformando assim um edifício em risco de colapso quando solicitado por um sismo, numa estrutura segura.

Hoje em dia existem diversas técnicas, muitas delas bastante eficazes, de reforço de estruturas de betão armado [1].

- Reforço com chapas coladas;
- Reforço com compósitos;
- Reforço por alteração do sistema estrutural;
- Reforço por Encamisamento;
- Reforço por pré-esforço (exterior ou interior).

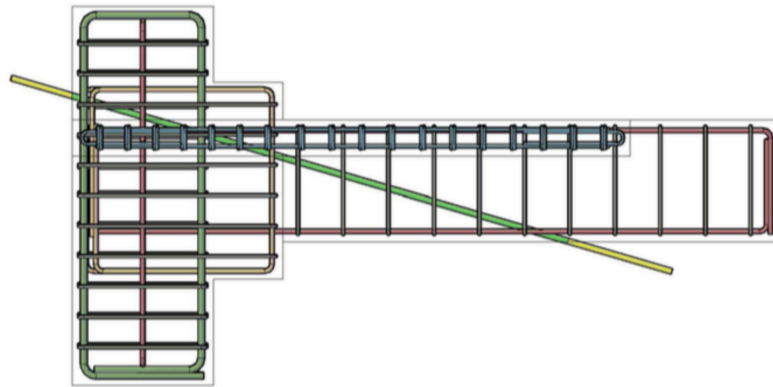
A escolha do método de reforço a utilizar depende de vários condicionalismos que é necessário avaliar com cuidado de modo a obter os melhores resultados:

- Custos;
- Longevidade requerida para a estrutura;
- Agressividade do meio ambiente;
- Prazo da obra;
- Acesso ao elemento estrutural em questão.

O reforço por pré-esforço apresenta vantagens em relação a outros sistemas pelo facto de ser um sistema ativo. Isto significa que pode contrariar deformações causadas por ações instaladas na estrutura antes da execução do reforço. Existem atualmente vários sistemas de pré-esforço variando estes, no modo como a tensão dos cordões é transmitida para o betão. Nos sistemas por pós-tensão, o pré-esforço é aplicado após a betonagem e transferido ao betão ao longo das armaduras e através de dispositivos mecânicos nas zonas de ancoragem. Por outro lado, nos sistemas por pré-tensão, o aço é tensionado antes da betonagem e só depois é que o pré-esforço é transferido para o betão por aderência entre o aço de pré-esforço e o betão ao longo do comprimento de transferência. A aderência e o comprimento de transferência têm sido muito estudados, principalmente nos últimos 50 anos. Neste trabalho, aprofunda-se o conhecimento sobre a aderência de cordões de 15,7 mm de diâmetro nominal pré-esforçados com uma força de 100 kN através da injeção de resinas epoxídicas em furos de 18 mm de diâmetro realizados em blocos de betão armado. Foram feitos ensaios de transferência de pré-esforço (*push-in*) e ensaios de arrancamento (*pull-out*) com dois comprimentos de selagem diferentes de modo a avaliar a sua resistência. Para além dos ensaios de arrancamento monotônicos, foram também realizados ensaios cíclicos para melhor compreender o comportamento das ancoragens por aderência quando sujeitas a ações sísmicas.

## **1.2 Objetivos**

O sistema de aderência proposto destina-se a ser utilizado futuramente no reforço de elementos de betão armado, nomeadamente no reforço de vigas para as ações sísmicas. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo estudar a transmissão de forças entre o cordão de pré-esforço e o betão por aderência utilizando a resina HIT-RE V3 da Hilti. Na Figura 1.1 ilustra-se o sistema de reforço proposto no reforço de uma viga (trabalho de investigação em curso na FCT-UNL para o doutoramento da Helisa Muhaj).



**Figura 1.1 - Aplicação do sistema de aderência de pré-esforço proposto no reforço de uma viga - trabalho em curso na FCT-UNL no âmbito do doutoramento da Eng<sup>a</sup> Helisa Muhaj**

## **1.3 Organização da Tese**

O corpo principal deste trabalho divide-se em cinco capítulos sendo que o primeiro constitui uma introdução ao tema a analisar.

O segundo capítulo contém o estado do conhecimento atual acerca do tema estudado e sobre assuntos relacionados. É introduzida a matéria do pré-esforço e todos os tópicos inerentes a este.

O terceiro capítulo detalha o sistema de ensaio e a sua montagem. Descreve os materiais utilizados e os ensaios realizados para os caracterizar. Explica detalhadamente, o processo de furação, limpeza, montagem dos ensaios de transferência de pré-esforço e de arrancamento e injeção.

No quarto capítulo apresentam-se e interpretam-se os resultados dos ensaios monotónicos e cíclicos. Descrevem-se também dois ensaios de observação que foram efetuados para complementar a informação dos anteriores. No primeiro, utilizou-se um tubo de vidro para visualizar a eficiência de injeção da resina no furo. No segundo foram retirados carotes de algumas ancoragens ensaiadas de modo a analisar a forma de rotura e disposição da resina.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho. É sintetizado o avanço obtido por esta dissertação e são sugeridas algumas ideias para trabalhos futuros.



## **2 ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados trabalhos de investigação realizados por diversos autores sobre os sistemas de pré-esforço. Na secção 2.3 é descrita a informação existente na bibliografia sobre os materiais que foram utilizados nos trabalhos experimentais. Seguidamente introduz-se o tema das ancoragens por aderência do sistema de pré-esforço por pré-tensão. Por último é aprofundado o estado da arte sobre as resinas epoxídicas e é apresentada a sua aplicação na engenharia civil. A solução de ancoragem por aderência de pré-esforço para o reforço de estruturas de betão usada na presente dissertação é descrita na patente de invenção do instituto nacional da propriedade industrial [2].

### **2.2 Aspetos Gerais**

O conceito de pré-esforço é utilizado há centenas de anos em objetos de utilização comuns tais como as rodas de madeira ou barris. No caso da roda é aplicada uma chapa metálica no perímetro externo como se pode observar na Figura 2.1 a).



a) Roda de madeira



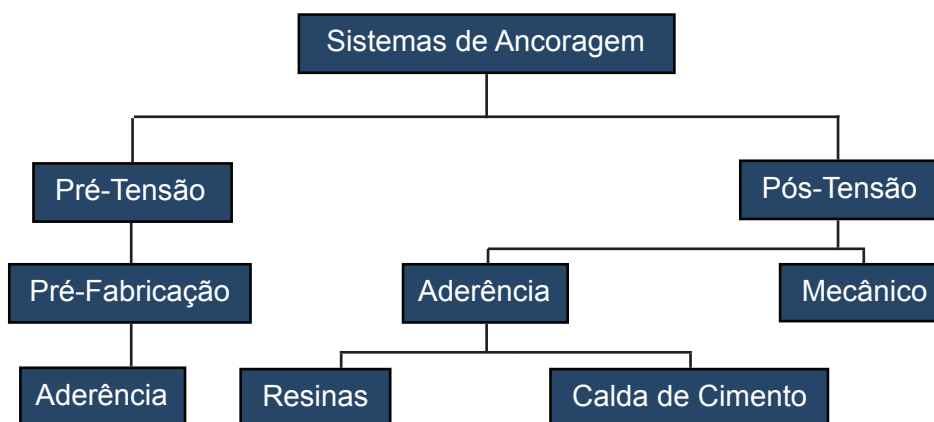
b) Barril de madeira

**Figura 2.1 – Primeiras utilizações do conceito de pré-esforço**

Esta chapa é cortada com um comprimento ligeiramente menor do que o perímetro exterior do aro em madeira. Seguidamente, a chapa metálica é aquecida, dilatando, sendo presa à madeira com pregos. Ao arrefecer, volta a encolher, aplicando uma tensão constante no aro de madeira e nos raios. Isto confere características monolíticas à roda, que dependendo da relaxação do metal utilizando, pode atuar durante centenas de anos [3].

O barril da Figura 2.1 b) é pré-esforçado com uma técnica semelhante à da roda, sendo que neste, existem duas fases de pré-esforço. A primeira é introduzida pelas chapas metálicas que envolvem o barril, assim como no caso da roda. A outra fase resulta da dilatação da madeira devido à absorção do líquido que é armazenado no barril. Desta forma, todas as possíveis zonas de passagem do líquido para o exterior ficam seladas com a força do pré-esforço. Por esta razão, muitos dos barris que deixam de ter líquido no interior, desmancham-se sem ser necessária nenhuma força externa. Esta técnica foi aplicada a muitos outros objetos. No início do séc. XX, com a generalização da utilização do betão, a técnica foi aplicada também a este material por Eugène Freyssinet [4]. Desde então, o pré-esforço em betão armado tem evoluído significativamente.

A Figura 2.2 indica de forma esquemática os vários tipos de ancoragem:



**Figura 2.2 - Sistemas de ancoragem (adaptado de [3])**

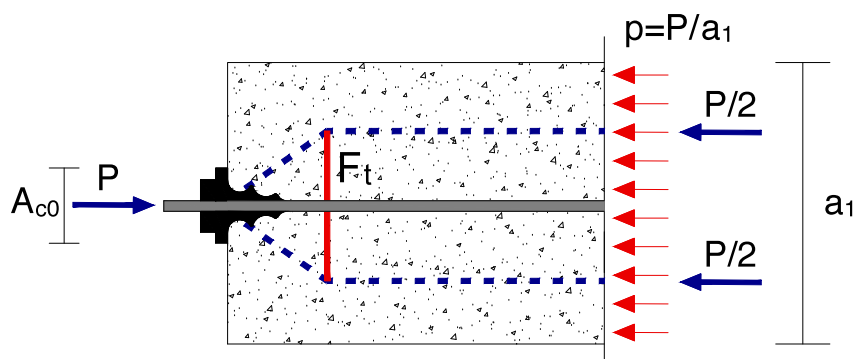
O pré-esforço por pré-tensão, utilizado na indústria da pré-fabricação é comum em vigotas, em lajes alveoladas e em vigas para coberturas e pontes. Este sistema tem um controlo de qualidade elevado devido a ser executado em fábrica, mas tem pouco interesse para o reforço de elementos estruturais. O presente trabalho vai, portanto, focar-se nos sistemas de pré-esforço por pós-tensão com o objetivo de reforçar elementos estruturais.

Nos sistemas de pós-tensão, a força de tração do cabo pode ser transferida para o betão por ação mecânica, através de dispositivos mecânicos de ancoragem (ancoragens de pré-



esforço), ou por aderência. Quando se utilizam ancoragens de pré-esforço, as forças, por serem aplicadas numa área reduzida de betão geram tensões de compressão elevadas, podendo causar roturas por esmagamento.

Numa estrutura nova, o betão pode ser especificado com a resistência adequada para resistir a estas tensões. No caso do reforço de estruturas, o betão existente pode não ter resistência suficiente para resistir a estas tensões de compressão. Para além disto, o pré-esforço provoca tensões de tração no betão, que são explicadas pelo método das escoras e tirantes [5] tal como ilustrado na Figura 2.3. Para resistir a estas tensões devem ser previstas armaduras nesta zona. Numa situação de reforço de um elemento estrutural, é difícil colocar esta armadura. Por outro lado, a amarração feita com uma cabeça de ancoragem, implica a alteração das dimensões da peça, o que consoante o projeto em causa, pode ser um aspeto negativo.



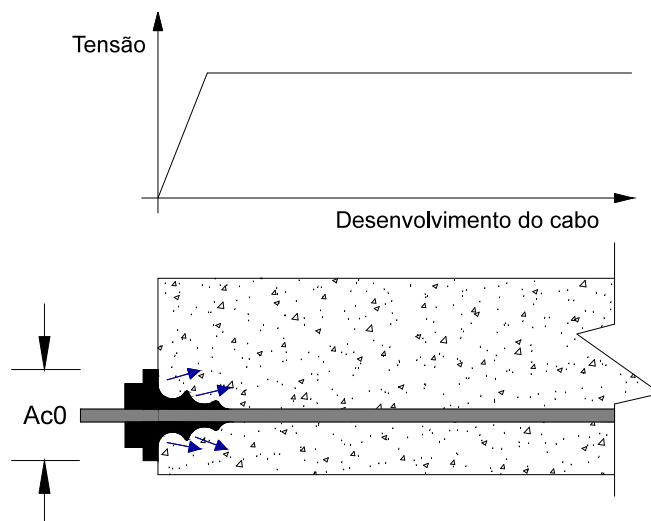
**Figura 2.3 – Modelo de escoras e tirantes na zona de ancoragem do pré-esforço**

Sendo que  $F_t$  representa a força de tração no betão provocada pelo pré-esforço.

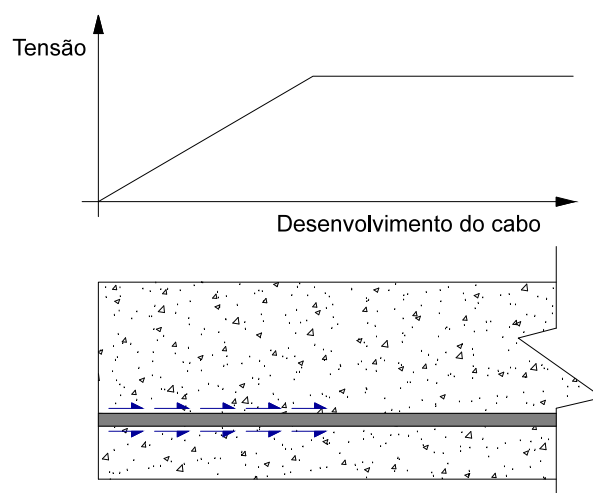
O sistema de ancoragem por aderência estudado no presente trabalho tem vantagens em relação a estes aspetos pois a amarração é feita no interior do betão, através da utilização de um ligante, pelo que o reforço não é visível e as dimensões do elemento mantêm-se inalteradas. A força de pré-esforço é transmitida ao betão por aderência ao longo de um comprimento (comprimento de transferência do pré-esforço) reduzindo significativamente as tensões de compressão e de tração do betão na zona de ancoragem.

Quando se aborda a aderência, introduz-se um conceito que tem sido tema de estudo desde o aparecimento do betão armado: o comprimento de amarração. Este é o comprimento através do qual a tensão da armadura é transferida para o betão. Quando o pré-esforço é transmitido para o betão por aderência ao longo de um determinado comprimento – comprimento

de transferência – as tensões no betão aumentam gradualmente ao longo deste comprimento, como se ilustra na Figura 2.5 e não de uma forma concentrada como no caso das ancoragens mecânicas (Figura 2.4).



**Figura 2.4 - Pré-esforço com ancoragem mecânica: desenvolvimento da tensão no betão ao longo do cabo**



**Figura 2.5 - Pré-esforço com ancoragem por aderência: desenvolvimento da tensão no betão ao longo do cabo**

## 2.3 Materiais

Neste subcapítulo serão apresentados os materiais que podem ser utilizados numa ancoragem por aderência. O *grout* ou as argamassas especiais ou mesmo calda de cimento, assim como referido na secção 2.5 , são muitas vezes utilizados em ancoragens. No entanto,

estes materiais não se aplicam à situação prática em estudo devido ao espaço entre a armadura de pré-esforço e o betão utilizado nos ensaios experimentais ser demasiado reduzido para o livre acesso dos agregados do *grout*. Deste modo, apenas se aprofunda em detalhe o conhecimento das resinas epoxídicas, uma vez que este é o material utilizado no sistema estudado. Nesta secção será também comparado o comportamento das resinas com a calda de cimento. Seguidamente será feita uma breve explicação dos outros materiais que fazem parte do reforço por pré-esforço com ancoragem por aderência, o aço e o betão.

### **2.3.1 Resinas Epoxídicas**

As resinas à base de epóxi consistem em dois compostos químicos, a resina e o endurecedor. Quando estes se misturam, formam uma reação (polimerização) que provoca a ligação dos vários polímeros da resina, resultando num material com uma rigidez adequada para o uso do mesmo na construção [6]. O uso destas resinas é já bastante conhecido na construção sendo muito utilizado quando se necessita de ancorar uma armadura numa peça existente [7]–[12], para aplicar fibra de carbono num elemento estrutural [13], preencher fissuras no betão, ou até mesmo para acabamentos de pavimentos. Existem também resinas à base de fenóis, acrílico, poliéster ou poliuretano, que apesar de terem um custo menor, não são tão utilizadas. As resinas à base de epóxi apresentam uma elevada resistência e baixa viscosidade e volatilidade durante o processo de cura, superando por isso os restantes tipos de resina [14]. Possuem também baixa fluência e durante o processo de cura apresentam uma retração muito baixa. Têm uma elevada resistência ao óleo, à humidade e a solventes e podem ser facilmente modificados para atingir uma grande variedade de propriedades [15]. Todas estas vantagens justificam a sua vasta aplicação. As resinas epoxídicas devem ser utilizadas em ambientes com temperaturas entre -20° e 60°, acima das quais, se verifica a alteração da qualidade dos polímeros deixando de ser substâncias com boa rigidez e elasticidade, passando a ser um material viscoso e diminuindo o módulo de elasticidade. Este problema pode ser minorado com a adição de certos minerais como a sílica e a alumina [16].

### **2.3.2 Resina vs Calda de cimento**

As resinas surgiram na engenharia civil, em grande parte das suas aplicações para substituir as argamassas especiais ou as caldas de cimento. Ensaio realizados por Faria em 2011 [16] a provetes 4x4x16 mm<sup>3</sup> revelam a grande diferença entre o comportamento das resinas epoxídicas e calda de cimento, como é possível verificar pela Tabela 2.1:

**Tabela 2.1 – Resultados médios obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos agentes de aderência por Faria [16].**

	$f_{pcte}^{(1)}$ (MPa)	$f_{pcc}^{(2)}$ (MPa)	$E_f^{(3)}$ (GPa)	$E_{pc}^{(4)}$ (GPa)
HILTI HIT RE-500	49,1	108,8	2,1	3,7
SIKA ICOSIT KC 220/60	48,5	87,2	1,6	3,6
	$R_f^{(5)}$ (MPa)	$R_c^{(6)}$ (MPa)		
Calda de Cimento	6,2	54,4		


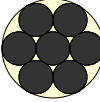
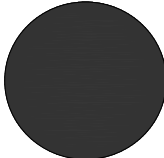
<sup>(1)</sup> tensão elástica de tração por flexão máxima; <sup>(2)</sup> tensão de cedência à compressão; <sup>(3)</sup> módulo de elasticidade em flexão;

<sup>(4)</sup> módulo de elasticidade em compressão; <sup>(5)</sup> resistência à flexão; <sup>(6)</sup> resistência à compressão

### 2.3.3 Aço para pré-esforço

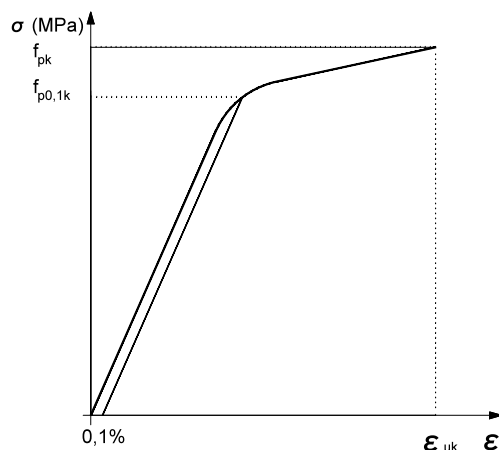
O aço utilizado em armaduras de pré-esforço deve ser aço de alta resistência. A tensão de rotura dos fios e dos cordões de pré-esforço, ilustrados na Tabela 2.2, é da ordem dos 1860 MPa e as barras mais utilizadas está entre os 1030 e 0 1230 kN. Devem também ter baixa suscetibilidade à corrosão sob tensão [5].

**Tabela 2.2 – Dimensões comuns dos diferentes tipos de elementos utilizados para pré-esforço (adaptado de [17])**

Tipo	Corte	Diâmetros Comuns (mm)		
• Fio de pré-esforço		$\phi 3, \phi 4, \phi 5, \phi 7, \phi 8$		
• Cordão de pré-esforço		Designação	Secção nominal (mm)	$\phi$ (mm)
		0,5"	100	12,7
		0,6"N	140	15,2
		0,6"S	150	15,7
• Barra de pré-esforço		$\phi 12 \text{ mm a } \phi 40 \text{ mm}$		

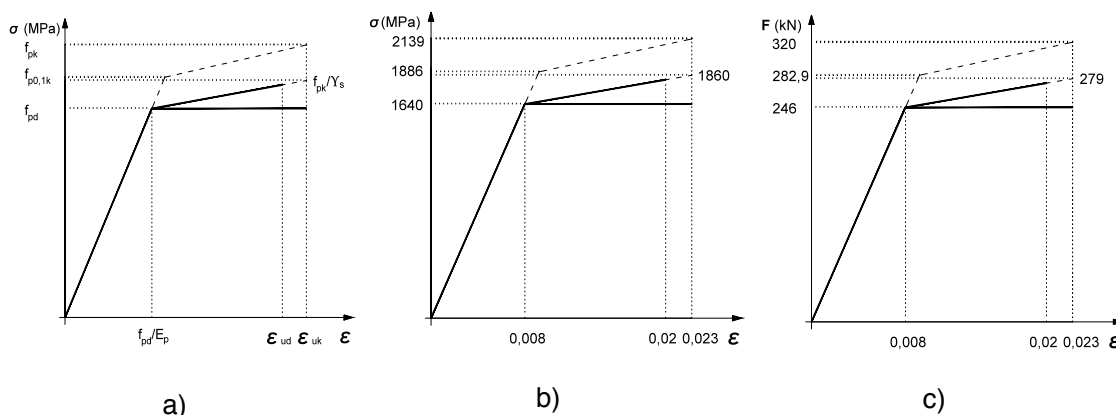
As armaduras de pré-esforço devem ser classificadas pela secção, classe, características da superfície; pelo valor característico da tensão limite convencional de proporcionalidade a

0,1% ( $f_{p0,1k}$ ); pelo valor da relação entre a resistência à tração e a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% ( $f_{pk}/f_{p0,1k}$ ) e pela extensão na carga máxima. Num caso real, o diagrama de tensão-extensão de um cordão de pré-esforço tem o seguinte desenvolvimento:



**Figura 2.6 - Diagrama de tensões-extensões do aço de pré-esforço (adaptado de [18])**

Os diagramas de cálculo são simplificações deste gráfico e estão representados na Figura 2.6:



**Figura 2.7 – a) Diagramas de cálculo, idealizados: tensão-deformação de um cordão de pré-esforço genérico; b) tensão-deformação para um cordão de pré-esforço 0,6’’S; c) força-deformação para um cordão de pré-esforço 0,6’’S**

### 2.3.4 Betão

O betão utilizado para elementos estruturais pré-esforçados deve apresentar boa resistência nos primeiros dias após a betonagem, quando o pré-esforço é aplicado em betão novo. Se o pré-esforço for aplicado em betão velho, apenas é relevante a resistência na altura da

aplicação. De acordo com [4], a classe mínima do betão utilizado para esta aplicação é C25/30.

## **2.4 Ancoragem de pré-esforço por pré-tensão**

A presente secção refere-se ao pré-esforço por pré-tensão onde, tal como na solução em estudo, a transferência de pré-esforço é realizada por aderência.

As principais condicionantes na ancoragem por aderência de pré-esforço, segundo estudos realizados por [11], [19]–[21], são:

- 1) Resistência do Betão – quanto maior a resistência do betão, melhor a qualidade da ligação e consequentemente, menor será o comprimento de transferência. Para além disto, um betão mais resistente aumenta a possibilidade de aplicar tensões localizadas devido ao pré-esforço;
- 2) Diâmetro do cordão – do qual depende a área de contacto entre os dois materiais, estando diretamente ligado ao comprimento de transferência. A este diâmetro está também diretamente ligada a força máxima de tração do cordão;
- 3) Tensão aplicada no cordão – o aumento da tensão no cordão de pré-esforço implica um aumento do comprimento de transferência;
- 4) Tipo de aço – altera o tipo de ligação entre os dois materiais;
- 5) Geometria da secção transversal do cordão – assim como o diâmetro do cordão, a sua geometria também afeta a área de contacto, alterando, portanto, a quantidade de material aderente e consequentemente, o comprimento de transferência. A esta geometria está também ligada a ação mecânica da ligação que será abordada mais à frente na secção 2.4.1.5;
- 6) Estado e qualidade da interface entre os materiais;
- 7) Recobrimento e espaçamento das armaduras – o estado de tensão no betão na periferia das armaduras de pré-esforço é condicionado pela distância entre armaduras, condicionando o comprimento de transferência;
- 8) Velocidade da transferência do pré-esforço – este fenómeno será tratado na secção 2.4.4.

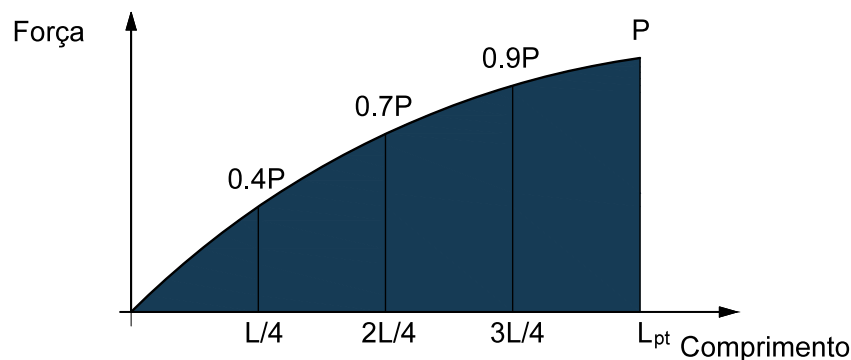
A resistência do betão é uma condicionante do comprimento de transferência quando a ligação aço-betão é feita pelo próprio cimento do betão. Nas secções seguintes, avalia-se a amarração entre o aço e o betão em pós-tensão utilizando uma resina como agente de

aderência. Neste caso a resistência do betão deixa de ter o papel tão importante que tem na pré-tensão.

## 2.4.1 Comprimento de transferência (ou de selagem)

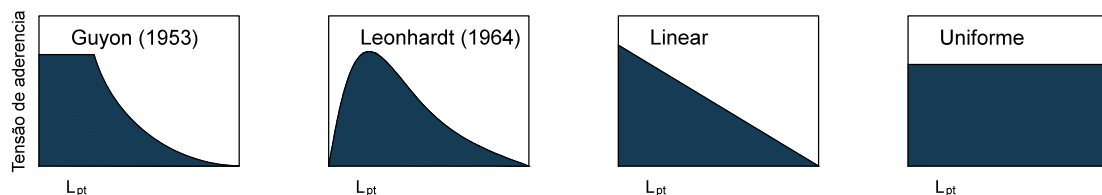
### 2.4.1.1 Comprimento de transmissão

O comprimento de transmissão  $L_{pt}$  refere-se ao comprimento necessário para transmitir a totalidade da tensão aplicada no pré-esforço ( $f_{ps}$ ) do aço para o betão. Este comprimento é menor do que o comprimento necessário para assegurar a transmissão da combinação fundamental (estados limite últimos) das forças aplicadas à estrutura. A distribuição da força no cordão ao longo deste comprimento de transmissão, de acordo com Raju [22] tem o aspeto que se apresenta na Figura 2.8:



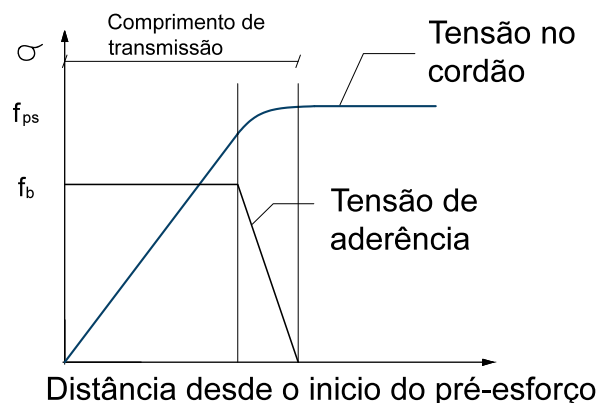
**Figura 2.8 - Distribuição de forças no cordão de pré-esforço no desenvolvimento do comprimento de transferência (adaptado de [23])**

Raju [24] sustenta que a tensão de aderência poderá ter uma das evoluções apresentadas na Figura 2.9:



**Figura 2.9 - Desenvolvimento da tensão de aderência ao longo do comprimento de transferência (adaptado de [24])**

Outros estudos realizados para o *PCI* mostraram as seguintes distribuições da tensão no cordão de pré-esforço ao longo do comprimento de transmissão e do desenvolvimento da tensão de aderência, ou derivada da anterior, ao longo do mesmo comprimento:



**Figura 2.10 – Desenvolvimento da tensão no cordão de pré-esforço e da tensão de aderência ao longo do comprimento de transmissão (adaptado de [25])**

Neste gráfico,  $f_{ps}$  representa a força de pré-esforço e " $f_b$ " a tensão de transferência de aderência na ligação entre os dois materiais.

#### 2.4.1.2 Comprimento de transmissão ao longo do tempo

O comprimento de transmissão aumenta com o tempo devido à retração do betão. Para além desta causa, a parte inicial do comprimento de transmissão,  $0,1 L_{pt}$ , perde a capacidade de transmissão de tensões entre os dois materiais. Deste modo, o comprimento de transmissão é deslocado para o interior do elemento reforçado, resultando num aumento desta distância [24].

#### 2.4.1.3 Efeito de Hoyer

Na parte inicial do comprimento de transmissão ocorre o efeito de Hoyer, também conhecido como efeito de Poisson [26], [27] representado na Figura 2.11. Este fenómeno gera uma compressão radial no betão, o que aumenta a capacidade de aderência. Isto acontece porque, quando o cabo é pré-esforçado, diminui a sua dimensão radial. Ao ser destensionado, após a cura do material envolvente, e no processo de transferir a sua tensão para o ligante, este cordão vai tender a voltar à sua dimensão original. Como está confinado ao espaço moldado pelo ligante que o envolve, vai introduzir uma tensão na direção perpendicular ao seu desenvolvimento a este material.



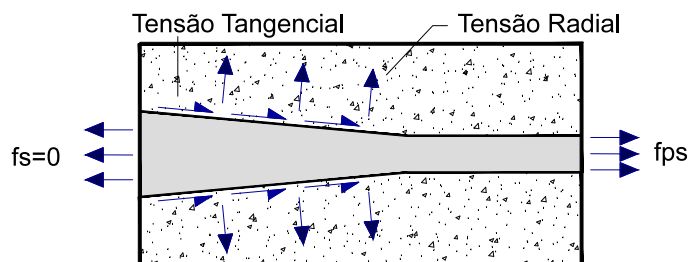


Figura 2.11 - Efeito de Hoyer (adaptado de [26])

#### 2.4.1.4 Comprimento de flexão

O comprimento de transmissão apenas é suficiente para resistir à força de pré-esforço. Quando esta força é incrementada, o comprimento de transmissão deixa de ser suficiente e é necessário acrescentar a este, o comprimento de flexão ( $L_b$ ) (devido aos ELU) [28], [29]. A soma do comprimento de transmissão com o comprimento de flexão resulta no comprimento de desenvolvimento ou comprimento de amarração ( $L_{bpd}$  ou  $L_d$ ) conforme ilustrado na Figura 2.12.

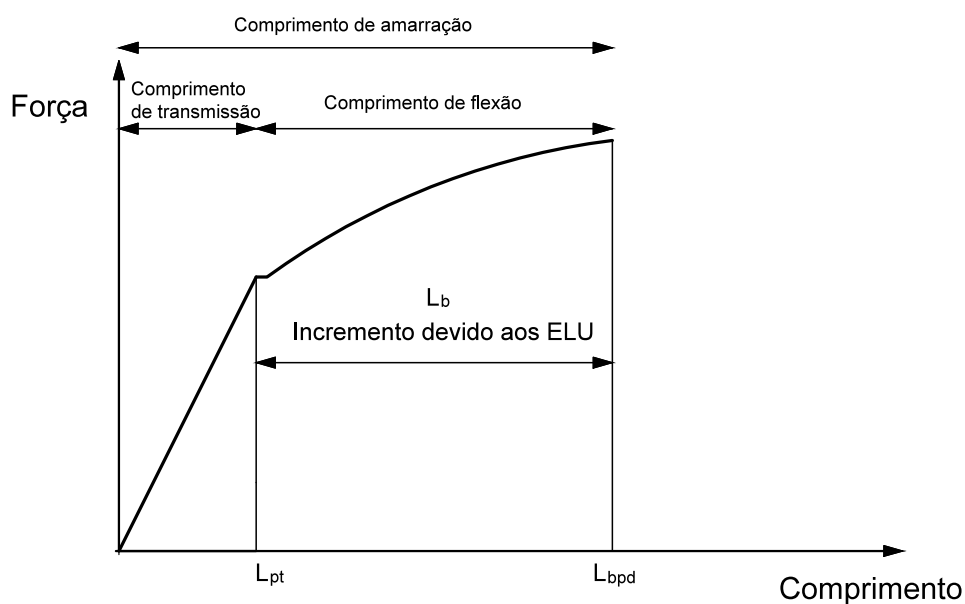
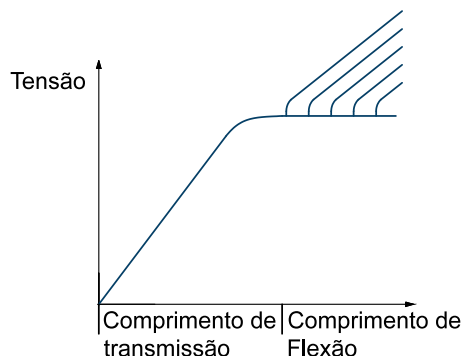


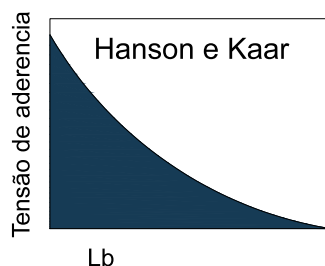
Figura 2.12 - Comprimento de transmissão, flexão e amarração (adaptado de [28])

T.Cousins, D. Johnston, e P.Zia, propuseram o desenvolvimento da tensão num cordão ao longo do comprimento de amarração [25] que se apresenta na Figura 2.12:



**Figura 2.13 - Desenvolvimento da tensão de tração de um cordão de pré-esforço ao longo do comprimento de transmissão e do comprimento de flexão (adaptado de [25])**

Tal como para o caso do desenvolvimento da tensão de aderência ao longo do comprimento de transmissão (ver Figura 2.9 e Figura 2.10), Hanson e Kaar [21] estudaram o desenvolvimento da tensão de aderência ao longo do comprimento de flexão (ver Figura 2.14). Este comprimento deve ser adicionado ao comprimento de transferência como mostrado na Figura 2.12 para obter o comprimento de amarração. Temos deste modo, uma ideia do desenvolvimento das tensões no cordão de pré-esforço e do desenvolvimento das tensões de aderência.



**Figura 2.14 - Tensão de aderência ao longo do comprimento de flexão**

#### 2.4.1.5 Componentes de aderência Aço-Betão

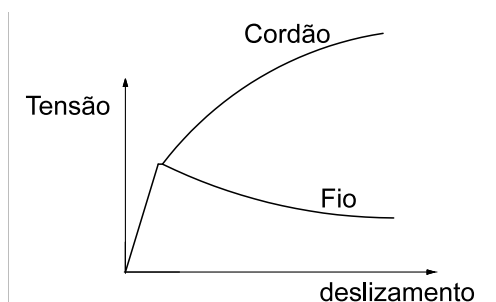
O mecanismo de aderência entre um cordão de pré-esforço e betão é constituído por três componentes [30]:

- Adesão;
- Atrito;
- Ação mecânica.

**Adesão:** é definida pela ligação física entre o aço, microscopicamente rugoso, e o betão. Este fenómeno caracteriza a ligação desenvolvida antes de existir escorregamento entre os

dois materiais. Esta parcela da ligação entre os dois materiais tem também uma forte componente química [31]. Quando aço é exposto ao ar durante um curto espaço de tempo cria uma camada oxidada no seu exterior. A água com as diversas substâncias do cimento que nela estão dissolvidas, penetra nesta camada, que cobre todo o aço, criando assim uma ligação de adesão.

Na Figura 2.15, esta fase é representada pelo troço reto crescente. Quando a adesão é quebrada, o atrito e a ação mecânica passam a dominar a ligação e é aqui que o tipo de secção passa a ter um papel importante. Note-se que após a perda de adesão, o cordão, que tem uma secção mais complexa do que a do fio, resiste a uma tensão superior. Isto acontece porque um cordão, devido à sua irregularidade, tem uma força de atrito somada à ação mecânica superior à força de adesão, ao contrario do que acontece num fio de pré-esforço.



**Figura 2.15 – Relação Tensão-Deslizamento para cordões e para fios de pré-esforço (adaptado de [12])**

**Atrito** [30], [32]: assim que a força de adesão deixa de ser suficientemente forte para resistir às tensões de corte impostas, a ligação passa a ser suportada pelo atrito entre a superfície do aço e o betão. Esta força, também designada por fricção, é definida pela equação:

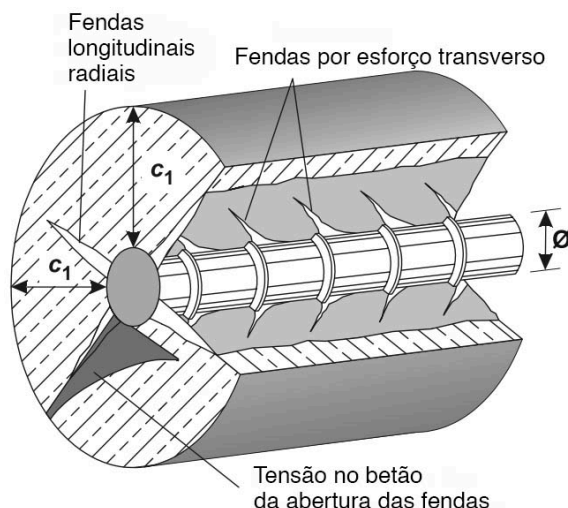
$$F = \mu \cdot N \quad (2.1)$$

Na qual F é a força de atrito,  $\mu$  é o coeficiente de atrito e N é a força normal à direção de desenvolvimento do cordão. A força normal é causada pelo efeito de Hoyer representado na Figura 2.11 e pela retração do ligante envolvente.

**Ação mecânica:** A ação mecânica representa uma parcela muito significativa na força de amarração entre o cordão e o betão. Esta ação depende em grande parte da forma do cordão e representa, deste modo, a ação predominante para cordões e para fios de pré-esforço. No caso dos cordões de pré-esforço com 7 fios, quando estes tendem a deslizar, efetuam este movimento em espiral. Este fenómeno acontece porque o betão se moldou ao cordão e, portanto, a saída mais fácil para o cordão é deslizar em espiral. Este fenómeno instala no

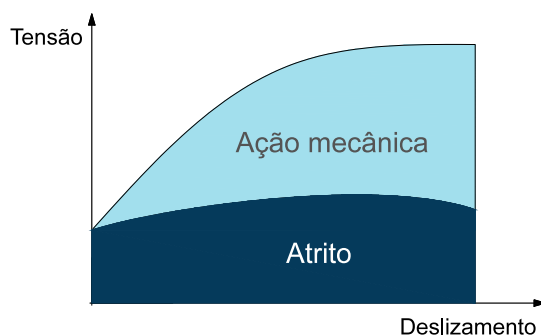
aço tensões que têm uma componente no sentido contrário ao deslocamento do cordão. É importante fazer a distinção entre a parcela da força causada pelo atrito e da força causada pela compressão e tração nos dois materiais devido à forma do cordão.

R. Tepfers estudou a ligação de um varão ao betão em 1973 na Chalmers University of Technology e referiu que se formam fendas devidas à força de corte que se gera ao longo das saliências de um varão de aço:



**Figura 2.16 - Representação das fendas causadas pela força de corte entre o aço e o betão (adaptado de [33])**

Isto prova a existência desta ação mecânica e realça a sua importância. Ladji [30] ilustrou a divisão das tensões de aderência tendo em conta o deslizamento de um varão:

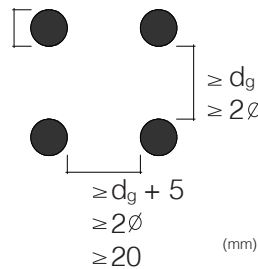


**Figura 2.17 – Relação Tensão-deslizamento com a divisão das tensões em ação mecânica e atrito (adaptado de [30])**

#### 2.4.2 Distância mínima entre as armaduras de pré-esforço

O Eurocódigo 2 [18], define espaçamentos mínimos obrigatórios para armaduras de pré-esforço individuais em caso de pré-tensão onde o agente de aderência é o próprio betão.

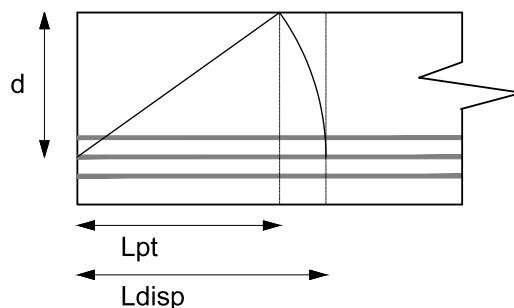
Estes espaçamentos estão ilustrados na Figura 2.18 onde  $d_g$  corresponde à dimensão máxima do agregado e  $\varnothing$  ao diâmetro nominal da armadura de pré-esforço.



**Figura 2.18 - Espaçamento mínimo para armaduras de pré-esforço individuais**  
(adaptado de [18])

### 2.4.3 Tensões no betão devido ao pré-esforço

A distribuição das tensões aplicadas no betão devidas ao pré-esforço, ao contrário das do aço, têm de ser interpretadas no seu desenvolvimento tridimensional. Até à secção na qual o campo de tensões se difunde de tal forma em que este campo tem distribuição linear, o elemento de betão não pode ser simplificado para aproximar uma peça linear. O comprimento desde o início do elemento estrutural até esta secção denomina-se comprimento de regularização, representa-se por  $L_{disp}$  e pode ser observado na Figura 2.19.



**Figura 2.19 - Comprimento de regularização ( $L_{disp}$ )** (adaptado de [18])

A geometria do elemento reforçado pode afetar o desenvolvimento das tensões no betão. Os fatores que se consideram influentes para este desenvolvimento são [24], [34]:

- Forma da secção do elemento reforçado;
- Localização e espaçamento das armaduras de pré-esforço;
- Quantidade de betão à volta das armaduras;
- Quantidade de armaduras que possam controlar a formação de fendas.

### 2.4.3.1 Fendas por pré-esforço

A distribuição de tensões no betão devido ao pré-esforço cria zonas de acumulação de forças, muitas vezes maiores do que as permitidas para o betão em zonas de distribuição linear, resultando assim em fendas. As fendas por pré-esforço devem-se à existência de tensões de tração ou esmagamento. Estas zonas críticas devem ter especial atenção e costumam situar-se na extremidade do elemento reforçado, ou na zona de amarração. A Figura 2.20 ilustra estas zonas separando as tensões e consequentemente as fendas em três tipos diferentes:

- Fendas por tração transversal (*Splitting*)– Resultam da transferência da tensão do cordão para o betão por aderência;
- Fendas por delaminação (*Bursting*)– São um resultado das tensões e fendas por *splitting*. Ocorrem tanto em betão pré-esforçado pré-tensionado como em betão pré-esforçado pós-tensionado;
- Fendas devidas à degradação da força concentrada ou esmagamento do betão (*Spalling*) – São um outro resultado das tensões e fendas por *splitting* e assim como nas tensões de *bursting*, podem ocorrer tanto no betão pré-esforçado pré-tensionado como no betão pós-tensionado.

As tensões devidas à degradação da força concentrada ou esmagamento do betão são as que causam o desprendimento dos materiais aderentes, resultando no final da aderência por adesão.

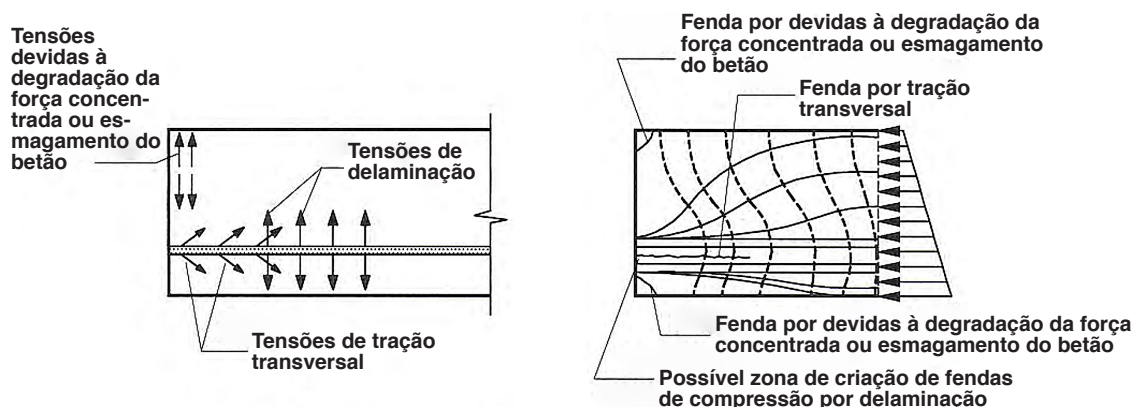


Figura 2.20 – Tensões devidas à degradação da força concentrada ou esmagamento do betão, por delaminação e por tração transversal (adaptado de [35])

Por comparação da Figura 2.20 com a Figura 2.16 verifica-se que as fendas que R. Tepfers nomeou de fendas por esforço transversal em 1973 e de fendas longitudinais radiais, coincidem com o que é referido como fenda por *bursting* e por *splitting* pela *Fédération internationale du béton* [35].

#### 2.4.4 Influência da velocidade na transferência do pré-esforço

A força de pré-esforço pode ser libertada a uma velocidade lenta, rápida ou instantânea. A libertação desta força a uma velocidade rápida ou instantânea provoca um deslizamento maior do cordão de pré-esforço no sentido do interior do betão. Isto pode dever-se ao facto das forças de inércia no impacto, serem adicionadas à força de pré-esforço. Este deslizamento resulta no deslocamento da zona aderente para o interior do betão, criando-se um comprimento inicial com tensões iguais a zero. Velocidades rápidas e instantâneas de libertação da força resultam portanto em comprimentos de transmissão maiores [36]–[40].

## 2.5 Ancoragens com resinas epoxídicas

Hoje em dia é comum, a utilização de resinas epoxídicas e buchas químicas na construção civil em caso de reforço de estruturas para aderir varões nervurados ou roscados ao betão. A alternativa a este material neste tipo de trabalhos são as argamassas especiais, ou *grout*.

### 2.5.1 Ensaios de arrancamento (*pull-out*)

A ancoragem de varões em betão neste tipo de situações é feita normalmente na seguinte ordem de ações [8]:

- 1º Execução do furo no betão com uma broca tipicamente com diâmetro não maior do que 1,5 ou 2 vezes o diâmetro do varão, dependendo se se irá utilizar resina ou *grout* respetivamente. Este furo é feito com o comprimento de embebimento do varão que irá ser utilizado;
- 2º Limpeza do furo com jato de ar e com um escovilhão rijo. Esta é uma fase importante de ser abordada com rigor pois um furo mal limpo pode resultar na redução da força de rotura. Segundo vários estudos, a forma como a limpeza do furo afeta a resistência de uma amarração depende em grande parte do tipo de agente de aderência em questão. Sabe-se que a resistência da ligação pode ter um decréscimo de 20 a 50% em relação à resistência de um furo limpo [22]. A limpeza apenas com o jato de ar não é suficiente para retirar as partículas soltas que irão reduzir a resistência da ligação. Esta advertência está relacionada tanto com os ensaios de arrancamento

como com os ensaios de transferência do pré-esforço que irão ser referidos na seção 2.5.2;

- 3º Injeção da resina. Nesta fase deve ter-se especial atenção para não haver desperdícios de resina podendo estes resultar numa menor área de contacto;
- 4º Aplicação do varão;
- 5º Aguardar o tempo necessário para a cura do agente aderente (dependente da marca e da temperatura do ar e do bloco).

Muitos estudos têm sido feitos para testar a força de arrancamento de varões ao betão com o tipo de ligação descrito anteriormente e para avaliar a melhor maneira de executar estas técnicas. Um dos fatores onde se deve ter especial atenção na aplicação de varões em furos feitos previamente é a direção em que são aplicados e a sua posição em relação ao centro do furo. O varão deve ser colocado de modo a deixar uma espessura uniforme de resina à sua volta.

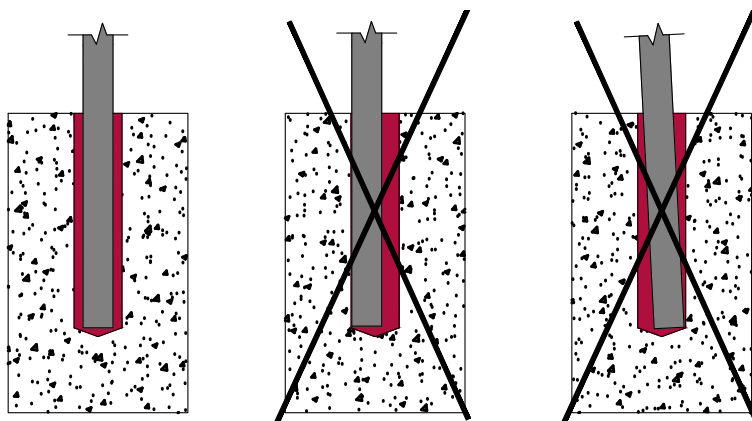


Figura 2.21 - Posição ideal do varão num furo (adaptado de [41])

#### 2.5.1.1 Modelos de tensão

Em 1998, foi publicado um artigo no “ACI Structural Journal” baseado em 888 ensaios, que definiu o modo como se distribuem as tensões na ligação de um cordão ao longo do comprimento de selagem [22]. Três condições foram dadas para se poder adotar um modelo uniforme de tensões:

$$4,5 \leq \frac{h_{ef}}{d_{em}} \leq 25 \quad (2.2)$$

$$13 \leq f_{cm} \leq 68 \text{ (MPa)} \quad (2.3)$$



$$1250 \leq A_b \leq 60000 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.4)$$

Onde:

- $h_{ef}$  representa o comprimento de selagem;
- $d_{em}$  representa o diâmetro do elemento metálico amarrado;
- $f_{cm}$  representa o valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em provetes cilíndricos (150x300 mm<sup>2</sup>);
- $A_b$  representa a área de contacto (sendo que num elemento metálico perfeitamente cilíndrico,  $A_b = \pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef}$ ).

Estando estas condições asseguradas e admitindo um comportamento rígido plástico, é possível calcular a força última de arrancamento através da seguinte expressão:

$$N_u = \tau \cdot \pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef} \quad (2.5)$$

Em que:

- $\tau$  representa a tensão média de aderência
- $N_u$  representa a força última de arrancamento

Para uma mais fácil interpretação, esta expressão pode também ser escrita da seguinte forma:

$$N_u = \tau \cdot A_b \quad (2.6)$$

Caso as condições (2.2 a 2.4) não se verifiquem, terá de se adotar o modelo elástico definido pela seguinte expressão:

$$N_u = \tau \cdot \pi \cdot d_{em} \cdot \left[ \frac{\tanh(\lambda h_{ef})}{\lambda} \right] \quad (2.7)$$

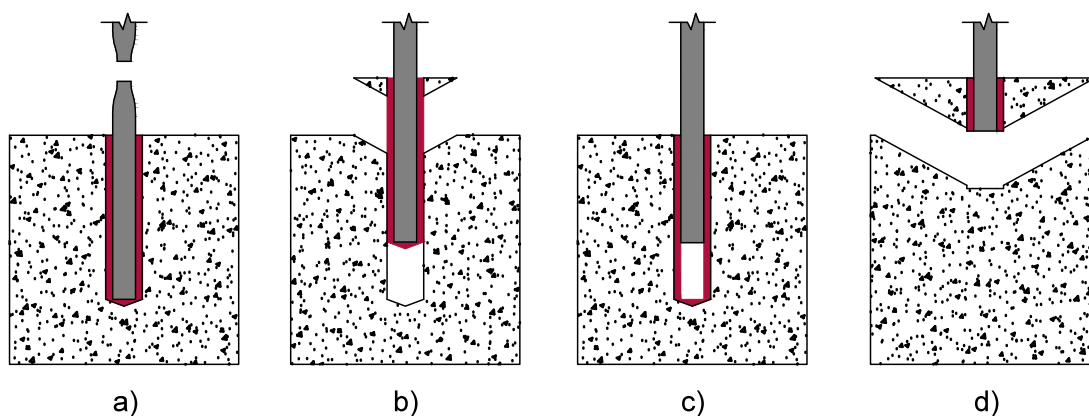
Sendo que  $\lambda$  representa a rigidez característica da ancoragem adesiva.

Para comprimentos de selagem relativamente pequenos, o termo entre parêntesis retos da equação é praticamente igual a  $h_{ef}$  e nesse caso, a equação é simplificada para o modelo uniforme de tensões. Para comprimentos de selagem maiores, este termo é menor do que  $h_{ef}$ . Isto indica que a força de amarração deixa de ter uma relação de proporcionalidade direta com o comprimento de selagem [22].

### 2.5.1.2 Mecanismos de rotura

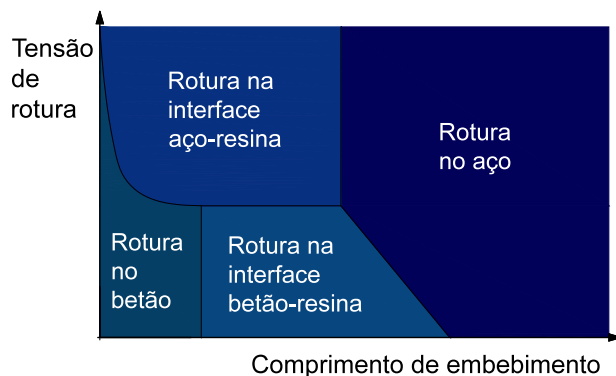
Existem vários mecanismos de rotura, estando eles representados na Figura 2.22.

- a) Rotura pelo varão. Este tipo de rotura demonstra que, tanto a ligação betão-resina como a ligação aço-resina são suficientemente fortes para não serem condicionantes na tensão de rotura;
- b) Rotura pela ligação betão-resina. Neste caso, a ligação mais fraca está na interface betão-resina. Neste tipo de rotura, no final da ligação, acontece o arrancamento de um cone de betão. Este fenómeno pode ser evitado se for deixado um comprimento maior ou igual a dois centímetros sem aderência. Para evitar a aderência nestes dois centímetros basta envolver o varão em fita-cola;
- c) Rotura pela ligação aço-resina. Este modelo de rotura depende do tipo de resina, mas também, em grande parte, do tipo de superfície do aço. Varões nervurados aumentam muito a resistência desta ligação;
- d) Rotura pelo betão. Este fenómeno está dependente da relação entre o diâmetro da ancoragem e o comprimento de embebedimento. Grandes diâmetros com pequeno comprimento de selagem, causam este tipo de rotura [42]. A formação do cone de betão é iniciada gradualmente, começando por ser criado um pequeno cone na face superior do betão, depois um segundo cone e assim progressivamente até ao arrancamento [10].



**Figura 2.22 - Tipos de rotura na ancoragem de um varão ao betão com resinas ou *grout***  
(adaptado de [43])

O gráfico da Figura 2.23 relaciona os 4 mecanismos de rotura referidos anteriormente com a tensão de rotura ao arrancamento e com o comprimento de transmissão.

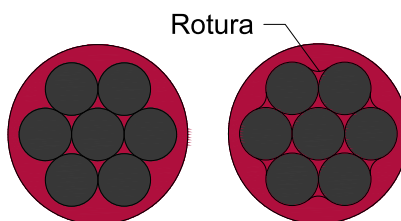


**Figura 2.23 - Mecanismos de rotura em função da tensão de rotura e do comprimento de embebimento (adaptado de [41])**

A formação do cone de betão reduz significativamente o comprimento de embebimento. Este cone é formado não só na rotura pelo betão, mas também na rotura pela ligação resina-betão. Neste caso, impedir a aderência da resina 2 a 5 cm a partir do início do bloco resolve este problema [10].

### 2.5.1.3 Perímetro de rotura

Após a perda da adesão, a resistência da ligação é assegurada pelo atrito e pela ação mecânica. Nesta situação, a tensão resistente depende da área de contacto entre o aço e a própria resina, isto porque a rotura se dá entre estes dois materiais como será demonstrado nos ensaios da secção 4.7. Na Figura 2.24 está ilustrado o perímetro de contacto entre as duas superfícies atuantes no atrito [22]. Este perímetro não contorna os fios até à união com os fios adjacentes pois a diminuição da espessura da resina nesta zona resulta numa perda da sua capacidade de resistir a tensões tão elevadas.



**Figura 2.24 - Perímetro de contacto entre as duas superfícies na ligação do cordão com o elemento reforçado**

### 2.5.1.4 Distância entre varões ancorados com resinas em ensaios de arrancamento

Esta distância é influenciada pelo diâmetro da ancoragem e pela resistência da ligação e não pelo comprimento de embebimento [8]. Para evitar a formação de dois cones unidos um ao outro, é importante, no caso de ancoragens próximas, evitar a aderência entre o aço e o

betão nos 2 a 5 cm do fim do furo. Os efeitos da proximidade de duas ancoragens na resistência à rotura por arrancamento são mínimos tendo sido registado por G. Doerr e R. Klingner [10] uma força última apenas 5% menor do que numa ancoragem individual, para uma proximidade de 10 centímetros dos dois cordões ensaiados.

#### 2.5.1.5 Resina vs Calda de cimento em ensaios de arrancamento

Ensaio realizados por Faria em 2011 [16] revelam uma grande superioridade nas qualidades de aderência de uma resina epoxídica em relação à calda de cimento. Esta diferença pode ser confirmada pela Tabela 2.3, onde se mostram os resultados de um ensaio de arrancamento. Na Tabela 2.1, já tinha sido mostrada a vantagem das resinas em ensaios de flexão e compressão em provetes 4x4x16. Agora é apresentada a sua vantagem numa situação prática de amarração.

**Tabela 2.3 - Resistência ao arrancamento num ensaio de arrancamento com diferentes agentes de aderência e diferentes comprimentos de embebimento [16]**

		$P_{el}^{(1)}$ (kN)	$P_{max}^{(2)}$ (kN)
HILTI	100 mm	30.4	60.8
	150 mm	43.4	88.0
	200 mm	57.7	126.3
SIKA	100 mm	29.1	63.5
	150 mm	33.4	101.0
	200 mm	35.3	90.7
Calda de Cimento	250 mm	20.3	35.8

<sup>(1)</sup> força limite de elasticidade; <sup>(2)</sup> força máxima.

#### 2.5.2 Ensaio de transferência do pré-esforço (*push-in*)

Ao contrario dos ensaios de arrancamento, nos ensaios de transferência do pré-esforço o cordão ensaiado é tensionado antes de ser amarrado com o agente aderente. Deste modo, ensaia-se um caso real de amarração de pré-esforço.

A ancoragem de varões em betão neste tipo de situações é feita normalmente na seguinte ordem de ações:

- 1º Execução do furo no betão com uma broca tipicamente com diâmetro não maior do que 1,5 ou 2 vezes o diâmetro do varão, dependendo se se irá utilizar resina ou *grout* respetivamente. Este furo é feito de um lado ao outro de um bloco de betão sendo este, normalmente apoiado em dois outros blocos deixando espaço para o cordão sair por baixo;

- 2º Limpeza do furo com jato de ar e com um escovilhão rijo. Esta é uma fase muito importante de ser tomada com rigor assim como foi referido para os ensaios de arrancamento no capítulo 2.5.1.
- 3º Aplicação do varão, preso tanto por cima como por baixo com um macaco e cilindro de cunhas ou um outro sistema;
- 4º Tensionamento do cordão até à força de pré-esforço pretendida;
- 5º Injeção da resina na interface aço-betão;
- 6º Aguardar o tempo necessário para a cura do agente aderente (dependente da marca e da temperatura do ar e do bloco);
- 7º Transferência do pré-esforço através da libertação da tensão num dos macacos com atenção ao que foi referido no capítulo 2.4.4. Este processo simula a transferência de pré-esforço da armadura para o betão num caso real.

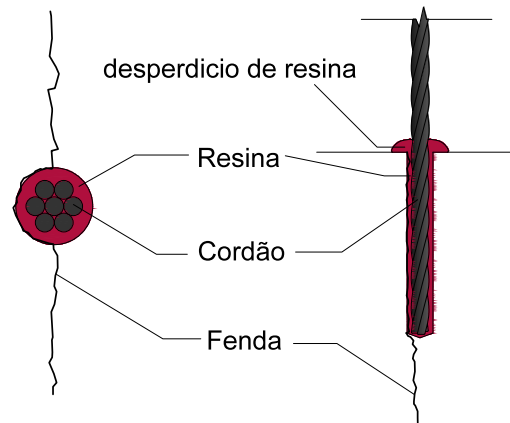
É comum, após a transferência do pré-esforço, ser feito um ensaio de arrancamento, avaliando a tensão de rotura da ligação. É importante aludir a que, a resistência de um ensaio de arrancamento num sistema onde foi feito anteriormente um ensaio de transferência do pré-esforço, será maior do que num sistema onde o este ensaio não foi feito.

### **2.5.3 Sistema de furação**

Dependendo do agente de aderência utilizado, o sistema de furação tem influência na resistência do ensaio. Diferentes técnicas resultam em furos com rugosidades distintas. Foi visto anteriormente que a rugosidade do cordão é importante para a ligação aço-agente de aderência. Sendo assim, também a rugosidade do furo é importante para a ligação agente de aderência-betão. Isto deve-se ao facto de, na situação presente, o agente aderente ter o papel de aderir tanto ao betão quanto ao aço.

### **2.5.4 Efeito da fendilhação do betão**

O efeito mais grave causado pelas fendas na resistência da ligação de uma ancoragem acontece quando a fenda é paralela ao elemento metálico, ver Figura 2.25. Um fenómeno que poderá acontecer quando uma fenda atravessa o furo é a perda de contacto entre o agente de aderência e o betão e consequentemente o elemento metálico será extraído juntamente com a resina.



**Figura 2.25 – Fissuração do betão junto de uma ancoragem**

### **2.5.5 Efeito da fadiga**

As ancoragens adesivas apresentam um comportamento semelhante ao das armaduras ordinárias. Para  $2 \times 10^6$  ciclos, a resistência à fadiga é aproximadamente 60% da resistência a curto prazo [16]. Mas poucos estudos foram feitos para ancoragens deste tipo no que diz respeito à fadiga.

## **3 TRABALHO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introdução**

Os ensaios que melhor caracterizam o comportamento de aderência são os de arrancamento e de transferência do pré-esforço. O presente trabalho consiste na realização de ensaios de transferência do pré-esforço, seguidos de ensaios de arrancamento em blocos de betão armado com cordões de pré-esforço de 7 fios e diâmetro nominal de 15,7 milímetros. Foram realizados inicialmente 6 ensaios com dois comprimentos de selagem diferentes: três com 400 mm e três com 500 mm. A partir dos resultados foi escolhido o comprimento que confere melhores características ao sistema para fazer os ensaios subsequentes. Seguidamente fizeram-se 3 ensaios cíclicos com incrementos de 15 kN a cada 3 ciclos até à perda de 50 % do pré-esforço. Após perdas superiores a 50 % foi feito um ensaio de arrancamento tal como nos ensaios monotônicos.

### **3.2 Materiais**

#### **3.2.1 Betão armado**

Os blocos de betão utilizados pertenceram a um trabalho realizado na FCT-UNL para a tese de mestrado de Moreira [44]. O betão solicitado foi um C30/37 com as seguintes características:

- Cimento Portland CEM I 42,5R fornecido em granel pela SECIL;
- Filler fornecido pela PARAPEDRA;
- Superplastificante Woerment FM 420;
- Relação água cimento  $A/C=0,4$ ;
- 3 tipos de agregados.

Para caracterizar o betão, foram ensaiados provetes cúbicos e cilíndricos à compressão, na prensa Seidner/Walter+Bay 3000D ilustrada na Figura 3.1 com 3000kN de capacidade de carga e 50 mm de deslocamento.



**Figura 3.1 - Prensa Seidner/Walter+Bay 3000D**

Os ensaios dos provetes cúbicos foram realizados com a imposição de uma força à velocidade de 11,25 kN/s e, no caso dos provetes cilíndricos, à velocidade de 8,80 kN/s. Estes ensaios tiveram os resultados que se apresentam na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 respetivamente. Estes ensaios foram realizados em 2016, logo, o betão utilizado no presente trabalho tinha já mais de um ano, portanto a sua resistência era superior a estes valores:

**Tabela 3.1 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cubos**

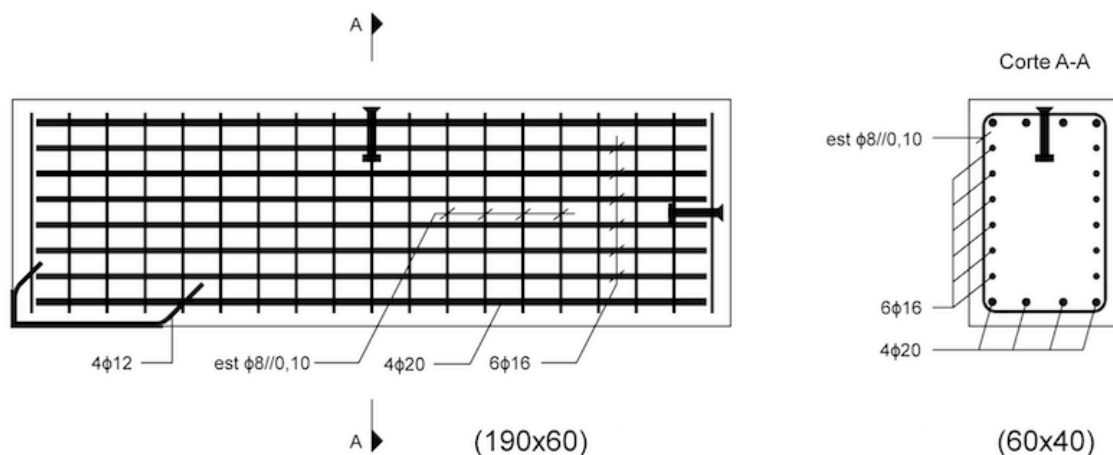
Ensaio	1	2	3	4	5	6
Idade (dias)	51	97	94	74	122	128
$f_{cm}$ (MPa)	51,27	58,93	66,76	52,99	59,41	59,09

**Tabela 3.2 - Tabela resumo da caracterização do betão obtido a partir dos ensaios à compressão em cilindros**

Ensaio	1	2	3	4	5	6
Idade (dias)	51	97	94	74	122	128
$f_{cm}$ (MPa)	47,95	57,93	62,95	52,35	60,89	54,72



O aço utilizado para armadura dos blocos é da classe A500NR. Os blocos foram armados como ilustra a Figura 3.2



**Figura 3.2 - Armadura dos blocos de betão armado utilizados para os ensaios de transferência do pré-esforço**

### 3.2.2 Cordões de pré-esforço

Os cordões utilizados são compostos por 7 fios e têm um diâmetro nominal de 15,7 mm têm a denominação Y1860 S7 0.6"S e estão representados na Figura 3.3:



**Figura 3.3 - Cordões de pré-esforço utilizados nos ensaios**

Estas armaduras de pré-esforço são caracterizadas por elevados valores de resistência e baixos coeficientes de relaxação. Na generalidade, os aços de pré-esforço designam-se por normais, super e compacto a que correspondem secções nominais de 140 mm<sup>2</sup>, 150 mm<sup>2</sup> e 165 mm<sup>2</sup>, respetivamente, sendo que o cordão utilizado é do tipo super. As características principais deste cordão estão enunciadas na seguinte tabela:

**Tabela 3.3 - Características do aço utilizado para os ensaios**

Diâmetro nominal	15,7	(mm)
Secção nominal	150	(mm <sup>2</sup> )
Peso nominal	1,18	(Kg/m)
Força de rotura $F_{pk}$	279	(kN)
Força correspondente à Tensão $f_{p0,1}$	246	(kN)
Força máxima de tensionamento $F_0$	221	(kN)
Módulo de elasticidade	195±10	(GPa)
Relaxação às 1000h (C12)	2,5	(%)

### 3.2.3 Resina epoxídica

A resina escolhida como agente de aderência para a realização dos ensaios foi a HIT-RE 500 V3 da Hilti, ver Figura 3.4. Esta decisão baseou-se nos resultados de Faria [16], obtidos na sua dissertação para obtenção do grau de Doutor em engenharia civil.



**Figura 3.4 - Resina HIT-RE 500 V3 utilizada nos ensaios**

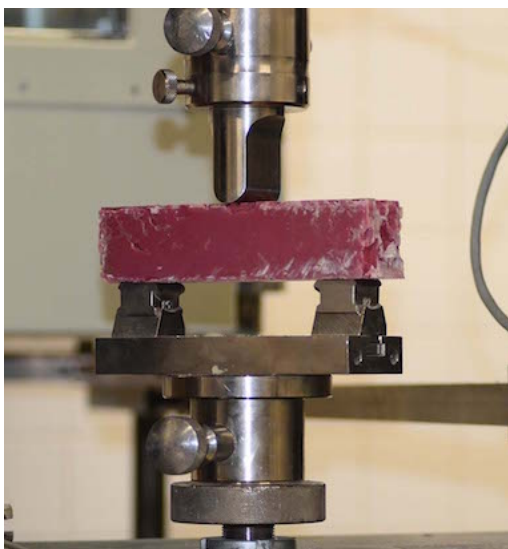
Para a caracterização da resina foram feitos 3 provetes de dimensões 40x40x160 mm<sup>3</sup>, os quais foram ensaiados à flexão e à compressão. De ensaios anteriores com resinas epoxídicas no laboratório da FCT-UNL sabe-se que, apesar de uma característica destas resinas ser não terem uma reação exotérmica muito acentuada durante a cura, quando se moldam provetes com dimensões tão grandes como os utilizados, esta reação torna-se importante, chegando a resina a entrar em ebulição. Este fenómeno cria bolsas de ar indesejáveis no interior do provete. Para evitar um aumento da temperatura ainda mais acentuado, ao preencher os provetes, apenas foi injetada a matriz central do molde, assim como se ilustra na Figura 3.5, de modo a não existir propagação de calor de um provete para o outro. O molde foi devidamente revestido com cera desmoldante.

Respeitando os prazos da marca para a cura da resina, cinco dias após a injeção dos moldes, retiraram-se os provetes e foram pesados e ensaiados à flexão na máquina Zwick Roell como demonstra a Figura 3.6 a). Após os ensaios dos 3 provetes, as 6 metades resultantes

foram cortadas de modo a formarem 6 provetes com exatamente  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  de dimensão e ensaiaram-se à compressão na máquina Seidner/Walter+Bai ag 3000D, como se mostra na Figura 3.6 b).



**Figura 3.5 - Execução dos provetes 40x40x160 de resina HIT-RE500 V3**



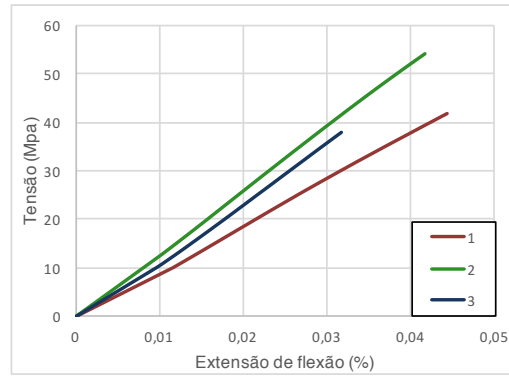
a)



b)

**Figura 3.6 – Ensaios para caracterização da resina HIT-RE500 V3**

A rotura dos provetes no ensaio à flexão, como se verifica na Figura 3.7, aconteceu para valores muito díspares ao contrário do que seria expectável num material tão homogéneo e isotrópico. Esta disparidade terá sido resultado da irregularidade dos provetes causada pela instabilidade do material aquando da cura.



**Figura 3.7 - Gráfico tensão-extensão para os ensaios de flexão aos provetes de resina com 40x40x160 mm<sup>3</sup>**

Na Tabela 3.4 indicam-se os valores mais relevantes associados ao ensaio à flexão dos provetes da resina onde:

- b e h correspondem à largura e altura do provete respetivamente. Estes valores deveriam ser sempre 40 milímetros, mas devido à irregularidade referida, foi feita uma medição para descartar a hipótese de justificar algum erro com esta anomalia;
- $d_{max}$  flecha máxima a meio vão;
- $P_{max}$  força máxima;
- L distância entre os dois apoios;
- I inércia dos provetes;
- $f_{pct}$  tensão de tração por flexão máxima na rotura;
- E módulo de elasticidade;
- $\varepsilon_{pct}$  extensão de tração por flexão máxima na rotura.

Sendo que:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.1)$$

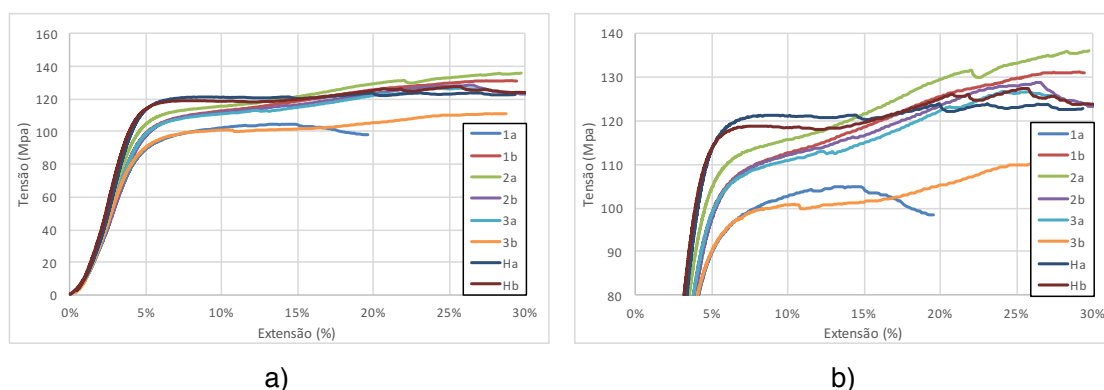
$$f_{pct} = \frac{3 P_{max} \cdot L}{2 b \cdot h^2} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{pct} = 6 \frac{d_{max} \cdot h}{L^2} \text{ ou } \varepsilon_{pct} = \frac{f_{pct}}{E} \quad (3.3)$$

**Tabela 3.4 - Características dos provetes de resina à flexão**

Proвете	b (mm)	h(mm)	d <sub>max</sub> (mm)	P <sub>max</sub> (kN)	L (mm)	I (mm <sup>4</sup> )	f <sub>pct</sub> (MPa)	E (GPa)	ε <sub>pct</sub> (%)
1	40,00	40,69	1,818	18,5	100	224565	41,8	0,94	4,44
2	37,60	40,00	1,740	21,7	100	200533	54,1	1,29	4,18
3	40,00	40,80	1,296	16,9	100	226391	38,1	1,20	3,17

Nos ensaios à compressão, o comportamento da resina não é frágil como no caso da flexão, mas sim dúctil, tendo um patamar de plastificação. O módulo de elasticidade neste ensaio é mais variável do que no ensaio à flexão sendo que é necessário escolher uma zona da fase elástica do gráfico tensão-extensão representado na Figura 3.8, que corresponde ao módulo de elasticidade. A Figura 3.8 b) representa uma escala aumentada do gráfico da Figura 3.8 a).



**Figura 3.8 - Gráfico da tensão-extensão para os ensaios de compressão aos provetes de resina 40x40x40 mm<sup>3</sup>**

Em cada gráfico, foi escolhido o declive aproximadamente a meio da zona elástica para obter o módulo de elasticidade. Na Tabela 3.5 apresentam-se os valores mais relevantes associados ao ensaio à compressão dos provetes da resina.

**Tabela 3.5 - Características dos provetes de resina à compressão**

Provete	E (GPa)	E (GPa)	f <sub>cc</sub> (MPa)	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>pct</sub>
1a	2,5	2,7	77,7	81,3	Aproximadamente 4%
1b	2,9		84,9		
2a	3,2	3,0	91,5	86,9	
2b	2,8		82,3		
3a	2,9	2,8	84,5	82	
3b	2,7		79,5		
Ha	3,5	3,6	98,3	100,3	
Hb	3,6		102,3		

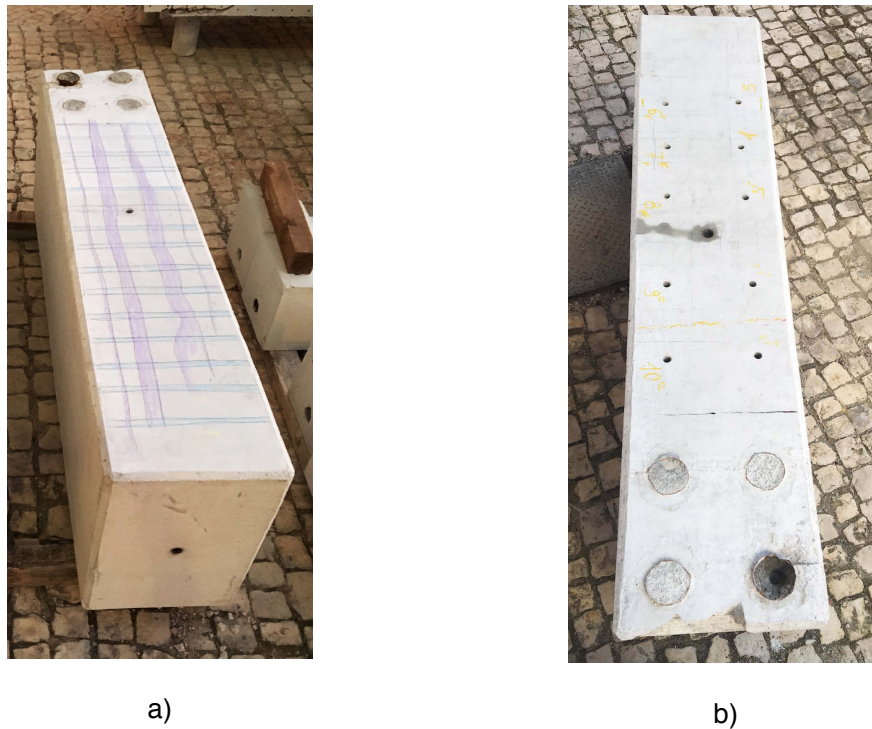
Sendo que,  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade e  $f_{cc}$  à tensão de plastificação. A segunda coluna de cada uma destas grandezas corresponde à média dos valores dos dois provetes  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  provenientes do mesmo provete  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Por último,  $\varepsilon_{pct}$  corresponde à extensão no instante de plastificação.

### **3.3 Preparação do ensaio**

#### **3.3.1 Furação do betão**

Foram executados 10 furos no bloco de betão, referido e detalhado no capítulo 3.2.1, com coroas diamantadas com diâmetro externo de 18 milímetros, utilizando apenas o modo de rotação da caroteadora (e não o de percussão) para minimizar os danos no betão. Foi necessário fixar a caroteadora com um varão preso num furo feito previamente num bloco de betão. Para evitar danificar o bloco ensaiado, optou-se por fixar a máquina a um outro bloco de betão, colocado ao lado do primeiro.

Utilizou-se um espaçamento de 200 mm entre os furos, como se representa na Figura 3.9 b). este espaçamento foi muito superior ao mínimo aconselhado pelo Eurocodigo 2 [18] referido no capítulo 2.4.2 que para o presente caso seria  $2 \times 15,7 = 31,4 \text{ mm}$ . Deste modo, não existe possibilidade de o ensaio num furo influenciar os valores do ensaio no furo mais próximo. Todos os furos foram feitos com água corrente de modo a evitar o sobreaquecimento da coroa, o que também ajuda à posterior limpeza do furo.



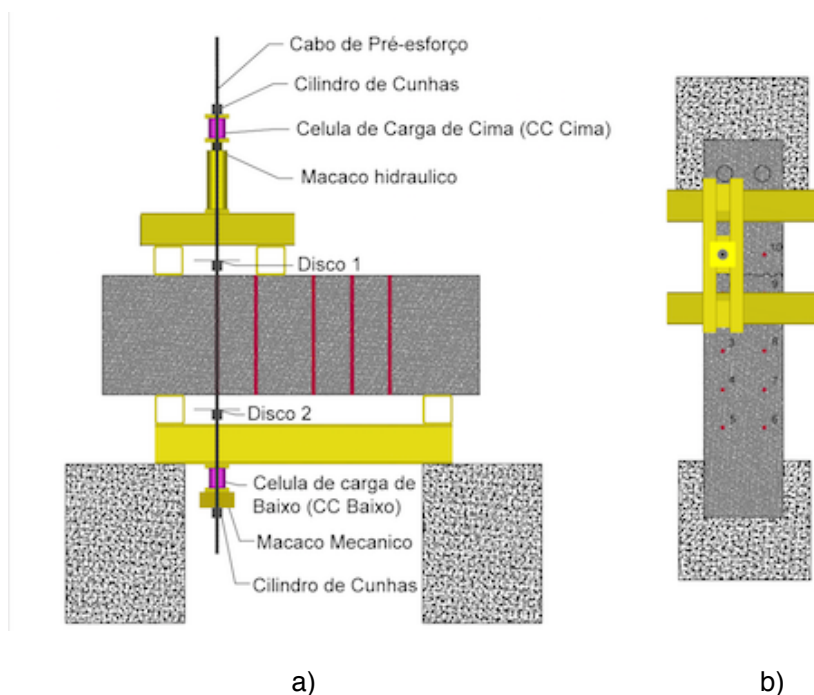
**Figura 3.9 – Bloco de betão utilizado nos ensaios**

### **3.3.2 Montagem e instrumentação do sistema de ensaio**

Após executados todos os furos, o ensaio foi montado como representado no esquema da Figura 3.10. Foram utilizados dois blocos de betão de dimensões  $800 \times 600 \times 600 \text{ mm}^3$  como base, onde se apoiaram duas vigas constituídas cada uma por dois perfis UPN 200 soldados entre si por intermédio de chapas. Estas vigas serviram para através de um macaco mecânico inferior, aplicar a tração no cordão. Nestas vigas apoiaram-se dois perfis RHS 150x150x10, um em cada extremidade, que sustentam o bloco de betão ensaiado e o afastam das vigas UPN, de modo a deixar espaço suficiente para colocar o disco para leitura dos deslocamentos. Por cima do bloco, colocaram-se mais dois perfis RHS 150x150x10 onde por sua vez se apoiou uma última viga constituída por dois perfis UPN 100 (ou UPN200) soldados entre si por intermédio de chapas. Estes elementos metálicos colocados em cima do bloco de betão foram alterando de posição consoante o furo onde se fez o ensaio. Poder-se-ia colocar um sistema igual ao da zona inferior, na zona superior, mas invertido, evitando a alteração de posição das vigas de um ensaio para o outro, todavia, as deformações que a vigas UPN200 iriam sofrer durante o ensaio acrescentariam mais um fator de incerteza. Com um pequeno vão evitam-se grandes deformações na viga UPN e por esta razão, optou-se por reposicionar estes elementos em cada ensaio. Este fenómeno não é tão gravoso na zona inferior como na zona superior pois a força máxima aplicada por



baixo é de 100 kN e logo após a cura da resina, esta força é libertada, deixando as vigas UPN200 inferiores sem cargas aplicadas, enquanto que a força máxima aplicada em cima ultrapassou os 200 kN. Esta é também a razão de na zona inferior ser utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN e na zona superior uma célula de carga com capacidade máxima de 300 kN. Nas vigas UPN100 (ou UPN200) colocadas na zona superior do sistema de ensaio, foi aplicada a força imposta por um macaco hidráulico, como representa o esquema da Figura 3.10. Para a aplicação e controlo da pressão do óleo no macaco hidráulico utilizou-se a unidade de controlo de pressão hidráulica Warter+bai ag representada na Figura 3.11.



**Figura 3.10 – a) Esquema do ensaio, em vista, b) em planta**





**Figura 3.11 - Unidade de controlo de pressão hidráulica Walter+bai ag**

Na zona inferior, como mostra a Figura 3.10, depois das vigas UPN 200, foi colocada uma célula de carga TML CLC200KNA com 200 kN de capacidade máxima, seguida de um macaco mecânico com três parafusos M20 e de um cilindro de cunhas para prender o cordão. Todos estes elementos foram devidamente separados por chapas metálicas. Na zona superior, depois das vigas UPN 100 (ou UPN200) foi colocado um macaco hidráulico ENERPAC RRH307 de 330 milímetros de altura e 300 kN de capacidade máxima, seguido de uma célula de carga TML CLC300KNA com 300 kN de capacidade máxima, seguida de um cilindro de cunhas para prender o cordão. Todos estes elementos foram também devidamente separados por chapas metálicas. O resultado desta montagem está representado na Figura 3.12. Note-se que no caso da imagem da a), na zona superior, foi utilizada uma viga com os perfis UPN200 e não com os UPN100. Isto deve-se à pouca resistência da viga com perfis UPN100 para resistir aos ensaios com 500 mm de comprimento de selagem.



a)



b)

**Figura 3.12 – Vistas gerais do sistema de ensaio**

### **3.3.3 Preparação do furo e do cordão de pré-esforço**

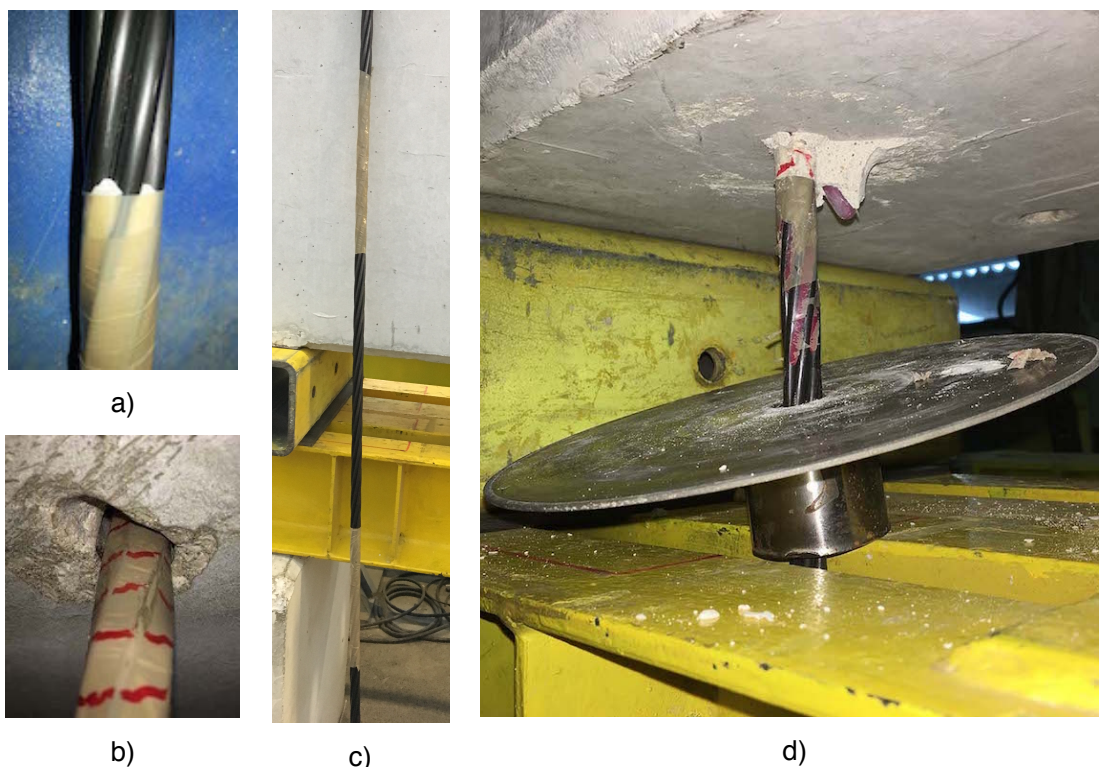
Antes de colocar o cordão no furo foi tido o devido cuidado com a limpeza de ambos. O cordão foi limpo com acetona em papel e nos casos em que a ferrugem estava mais entranhada, foi utilizada uma escova de aço. Por sua vez, o furo foi limpo com ar comprimido e seguidamente com um escovilhão próprio para estes furos, fornecido pela HILTI. Este processo foi repetido várias vezes até não haver pó a ser libertado quando se injeta ar no furo.

Foi referido no capítulo 2.4.1.5 que a ferrugem é favorável na ligação entre o aço e o betão, mas não é claro que este fenómeno seja aplicável ao caso da ligação com resinas. Mesmo que seja, a literatura apenas apresenta vantagens da oxidação do aço na fase de adesão. Uma vez quebrada esta ligação, não há nada que sustente a hipótese de a ferrugem ser benéfica para o aumento da resistência da ligação e como foi referido e irá ser comprovado mais à frente, a adesão é apenas o primeiro e o menos importante fenómeno da ligação.

Antes de colocar o cordão, foi feito um negativo do tubo de injeção da resina na extremidade inferior do furo, como se pode observar na Figura 3.13 b). Esta operação foi necessária

porque o espaço entre o cordão e a parede do furo era demasiado pequena para fazer passar este tubo tornando difícil a injeção da resina.

Para limitar a zona de aderência aos 400 mm ou 500 mm estabelecidos, aplicou-se fita-cola no comprimento onde não se pretende a aderência da resina como demonstra a Figura 3.13 c). Para impedir o fluxo da resina pelos espaços entre os fios do cordão e a fita cola, assim como ilustrado na Figura 3.13 d), foi colocada plasticina no final da zona de amarração, tanto em cima como em baixo, como ilustra a Figura 3.13 a).

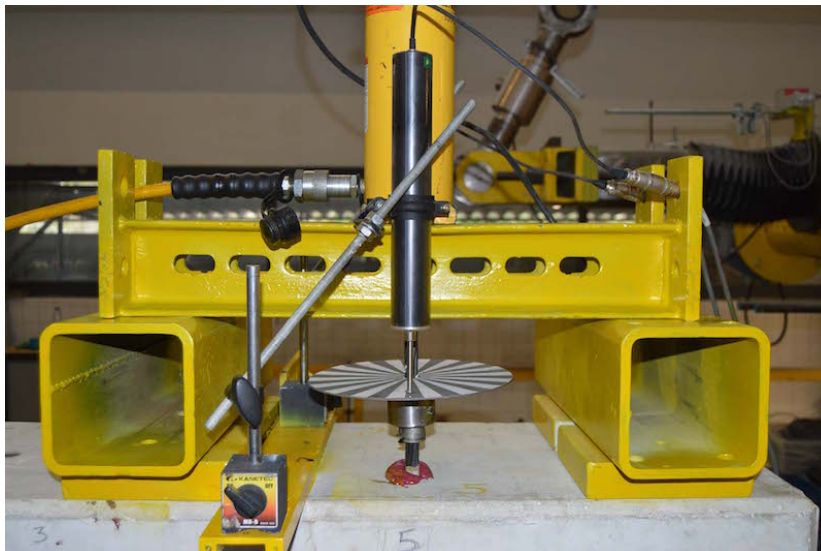


**Figura 3.13 – a) Plasticina no cordão para impedir o fluxo da resina, b) negativo do tubo de injeção no furo, c) fita-cola para limitar o comprimento de aderência, d) fluxo indesejado da resina pelo cordão**

### **3.3.4 Sistema de discos para medição do deslizamento do cordão**

Utilizaram-se defletómetros do tipo TML CDP-100, com curso máximo de 100 mm, para medição do deslizamento do cordão. Para a base de medição foi adaptado o sistema já utilizado por Faria [16], usando dois discos fixos ao cordão por dois cilindros de cunhas imediatamente acima e abaixo do bloco de betão, assim como ilustra o esquema da Figura 3.10, para medir o deslizamento do cordão nestas zonas. A utilização destes discos permite que o defletómetro continue a medir os deslocamentos apesar rotação do cordão durante o ensaio. Os defletómetros da zona superior do ensaio foram apoiados no próprio bloco de

betão. Já os defletômetros da zona inferior foram apoiados na mesma viga onde o macaco mecânico inferior foi apoiado. Utilizou-se um quinto defletômetro para medir a deformação desta viga.



**Figura 3.14 - Defletômetros e disco na zona superior do ensaio**

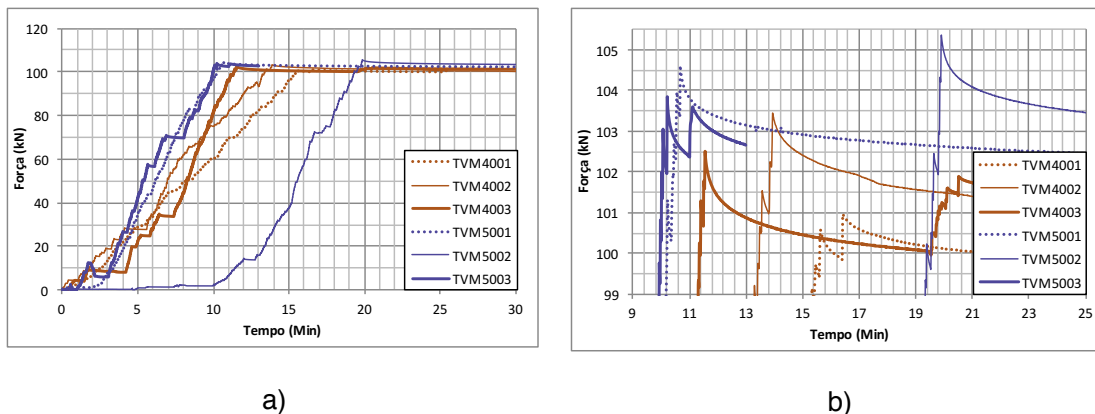
Na análise dos resultados, ao deslocamento medido nestes discos foi retirada a parcela da deformação do cordão no comprimento entre o próprio disco e a zona aderente dentro do bloco, tendo em conta a tensão aplicada a cada instante, de modo a anular os erros existentes. Em cada disco, foram posicionados dois defletômetros em posições diametralmente opostas a igual distância do cordão. Na análise destas medições, foi feita a média aritmética dos deslocamentos medidos pelos dois defletômetros para determinar o deslocamento com maior precisão.

### **3.3.5 Aplicação do pré-esforço**

Aplicou-se uma força de pré-esforço de 100 kN com o macaco mecânico na extremidade inferior do cordão. No início da aplicação do pré-esforço, a posição do sistema superior e inferior foi sendo reajustada pois, devido ao facto de estes cordões serem armazenados em rolos, apresentam uma curvatura que apenas é anulada com a aplicação do pré-esforço. Ao endireitar o cordão aquando da aplicação da força, este altera a sua posição em relação ao furo deixando de estar centrado. Sendo assim, para proporcionar uma distribuição uniforme da resina em volta do cordão, é importante fazer este reajuste durante os primeiros 10kN de força.

Após a aplicação do pré-esforço, verificou-se existirem perdas de tensão, que poderão advir da relaxação do cordão e de reajustes e de folgas do sistema de ensaio. Estas perdas vão

diminuindo ao longo do tempo estabilizando após algumas horas como pode observar-se nos gráficos da Figura 3.15. À perda de pré-esforço inicial está associado o deslocamento do cordão e sendo assim, para reduzir o seu impacto na fase de cura da resina, esta foi apenas injetada 24 horas após a aplicação do pré-esforço, quando as perdas e consequentes deslocamentos do cordão ao longo do tempo são desprezáveis. É importante referir que nesta fase, o macaco hidráulico superior se encontra totalmente recolhido, apenas funcionando como um elemento passivo para a reação da força aplicada no macaco mecânico.



**Figura 3.15 – a) Evolução da força ao longo do tempo durante a aplicação do pré-esforço  
b) pormenor do mesmo gráfico com escala aumentada**

### 3.3.6 Preparação e injeção da resina

Vinte e quatro horas após a aplicação do pré-esforço, começa a preparar-se a injeção do furo. Para tal, coloca-se o tubo representado na Figura 3.16 a), no negativo feito previamente no furo. Tapa-se o furo e isola-se todas as possíveis passagens da resina para o exterior com uma camada de betume de pedra e outra de gesso sobreposta à anterior, como ilustra a Figura 3.16 b). Esta etapa requer alguma atenção, pois uma selagem deficiente pode resultar no desperdício de resina e consequentemente na criação de espaços de ar na mesma, o que se reverte numa menor área de aderência. Após a cura do betume e do gesso, aproximadamente vinte minutos para cada um, usou-se a pistola de ar comprimido para, uma última vez, fazer a limpeza do furo antes de colocar a pistola de injeção da resina. Como representado na Figura 3.17 a), injeta-se a resina até esta sair pela extremidade superior do furo como ilustra a Figura 3.17 b). Por observação da forma como a resina saiu por cima, verifica-se se o cordão ficou bem centrado no furo. Após a injeção, retira-se cuidadosamente a pistola do tubo misturador e aguardam-se 48 horas para realizar o destensionamento do cordão na sua extremidade inferior (*push-in*) e posterior aplicação da força de arrancamento (*pull-out*).





a)



b)

**Figura 3.16 – a) furo antes da aplicação do gesso e do betume, b) tampão de betume de pedra e gesso**



a)



b)

**Figura 3.17 – a) injeção da resina, b) saída da resina na zona superior do furo**

## **4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **4.1 Introdução**

Nesta secção apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios de transferência do pré-esforço (*push-in*) e de arrancamento (*pull-out*), monotónicos e cíclicos realizados para o presente trabalho. Os ensaios cíclicos têm o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização desta técnica no reforço de estruturas sujeitas a ações sísmicas.

### **4.2 Particularidades dos ensaios**

Para simplificar a referência aos ensaios serão utilizadas as siglas TVM ou TVC para os ensaios monotónicos e cíclicos respetivamente. Imediatamente depois desta designação será indicado o comprimento aderente com o valor 400 ou 500 e seguidamente o número do ensaio. Por exemplo o terceiro ensaio monotónico com 500mm de comprimento aderente foi denominado de TVM5003. A partir desta secção, será utilizada a abreviatura CC Cima e CC Baixo para referir a célula de carga de cima e a célula de carga de baixo respetivamente. Todos os ensaios decorreram com temperaturas entre os 18° e os 20°.

No ensaio TVM4001 não foi utilizada a plasticina conforme descrito e aconselhado na secção 3.3.3. Este facto resultou na perda de resina ao longo do cordão desde o final da zona de aderência até à cunha que prende o disco 2. Este fenómeno condicionou bastante resistência final pois, como justificado na secção 4.3 é a causa da diminuição da área de contacto resina-betão e resina-cordão, resultando numa menor força resistente como se mostra na secção 4.5.2.

Entre os furos 1, 2, 9 e 10, assinalados na Figura 3.10 b) existia uma fenda no betão que pode ser observada no esquema da mesma figura. Esta fenda não influenciou nenhum valor dos ensaios mais próximos verificando-se que o betão fendilhado a 100 mm de distância dos furos não afeta os resultados. Esta situação é lógica uma vez que, como se refere na secção 4.7, a rotura deu-se na interface cordão-resina e não resina-betão. Assim como a fenda não influenciou os resultados, também o facto de se ter encontrado varões da armadura do bloco de betão durante a furação ou não, foi desvalorizado para a resistência final dos ensaios de arrancamento.

No ensaio TVM4002, por lapso, o pré-esforço foi aplicado com o macaco hidráulico não totalmente recolhido. Deste modo, quando se ligou o macaco à bomba, este recolheu repentinamente o êmbolo. Esta situação foi observada antes da transferência do pré-esforço. Por opção, provocou-se a recolha repentina do êmbolo do macaco hidráulico antes da transferência pelo macaco mecânico. Observou-se que a perda de pré-esforço para uma descarga repentina, ao contrário do que foi referido na secção 2.4.4, foi ligeiramente menor que a perda para uma descarga lenta. Para além desta observação, mais à frente no ensaio, notou-se também que ao contrário dos outros ensaios, este apresentou uma rotura plástica.

Em dois dos ensaios, (TVM4003 e o TVM5003), ocorreu um ruído de impacto a meio do ensaio, acompanhado de uma mudança brusca no valor da força e deslocamento do cordão em relação ao bloco. Este fenómeno assemelha-se a uma descarga brusca do pré-esforço. Estes ensaios, bem como o TVM4002, apresentaram um comportamento plástico verificando-se, portanto, que quando se aplica uma ação brusca e repentina, a rotura do ensaio em questão é plástica.

No ensaio TVC5001, devido à falta de espaço provocada pelo posicionamento do furo no bloco de betão, foi utilizado apenas um defletómetro para medir o deslocamento do cordão na zona inferior do bloco.



No ensaio TVC5002, os defletómetros na zona superior do bloco foram colocados com uma folga que adulterou a medição do deslocamento do cordão. Durante o mesmo ensaio, devido a um problema na bomba hidráulica representada na Figura 3.11, ocorreu um aumento brusco na pressão aplicada resultando no deslizamento brusco do cordão em relação ao bloco.

### **4.3 Ensaio com tubo de vidro**

De modo a complementar a informação retirada dos ensaios de transferência de pré-esforço e arrancamento, foram realizados dois ensaios para avaliar visualmente a eficiência da injeção da resina. Estes ensaios consistiram na colocação de um cordão igual ao utilizado nos outros ensaios, no interior de um tubo de vidro com aproximadamente o mesmo diâmetro interior dos furos utilizados nos ensaios anteriores. Este cordão foi pré-esforçado com 100 kN, foi injetada resina e observou-se o resultado. Foi possível avaliar visualmente o modo como a resina penetra num furo e também do modo como esta fica instalada após a cura. É importante referir que a diferença entre as características do betão e do vidro é significativa, dado que o primeiro é material poroso e o segundo não.

Observou-se, porém, que a resina é espalhada com bastante facilidade durante a injeção. Mesmo nas zonas onde o cordão se encontra praticamente encostado ao vidro, esta consegue penetrar. Este fenómeno prevê-se ser ainda mais favorável no caso do betão pois a sua porosidade, e baixa pressão intersticial dos poros poderão criar uma força de atração à resina.

No primeiro ensaio, devido a um mau isolamento na entrada do tubo da pistola, verificou-se uma perda significativa de resina. A perda de resina no segundo ensaio foi consideravelmente menor. Esta falha revelou-se ser benéfica para este trabalho quando se observou e comparou ambos os ensaios após a cura da resina. No ensaio 1, criaram-se bolsas de ar com quase 10 mm de diâmetro como se pode observar na Figura 4.1. Estas bolsas no ensaio 2 foram notavelmente menores. Percebeu-se, portanto, que a perda de resina durante a injeção pode causar a diminuição da área de contacto resina-betão e resina-cordão, resultando na diminuição da resistência num ensaio de transferência de pré-esforço ou de arrancamento.



a) Vista geral do ensaio



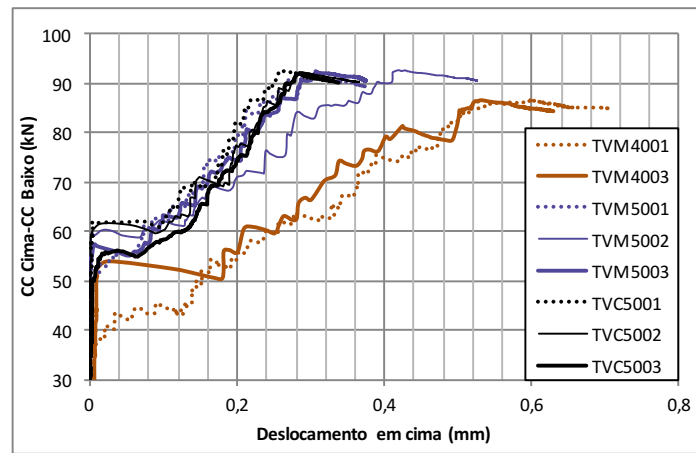
b) Aspetto dos tubos após injeção

**Figura 4.1 – Ensaio do tubo de vidro**

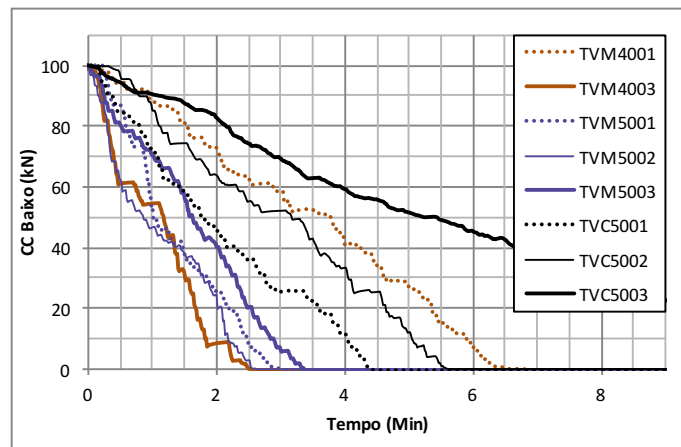
## 4.4 Transferência do pré-esforço (*Push-in*)

Nesta secção são apresentados os resultados dos ensaios monotônicos e cíclicos, uma vez que para a fase de transferência do pré-esforço não existe distinção entre eles, sendo, portanto, os resultados dos ensaios cíclicos, mais um termo de comparação e comprovação dos resultados. Para os comprimentos de amarração, tipo de resina, temperatura, tensão inicial aplicada, diâmetro do cordão e diâmetro do furo utilizados, é durante a transferência da força do sistema montado para a resina, que acontece a perda de adesão. Este fenómeno dá-se aquando do primeiro deslocamento do cordão conforme referido na secção 2.4.1.5 segundo a bibliografia revista.

Na Figura 4.2 apresenta-se a evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço (Figura 4.2 a)) e a evolução da força medida na extremidade inferior do cordão ao longo da transferência de pré-esforço (Figura 4.2 b)) para os ensaios realizados.



a)



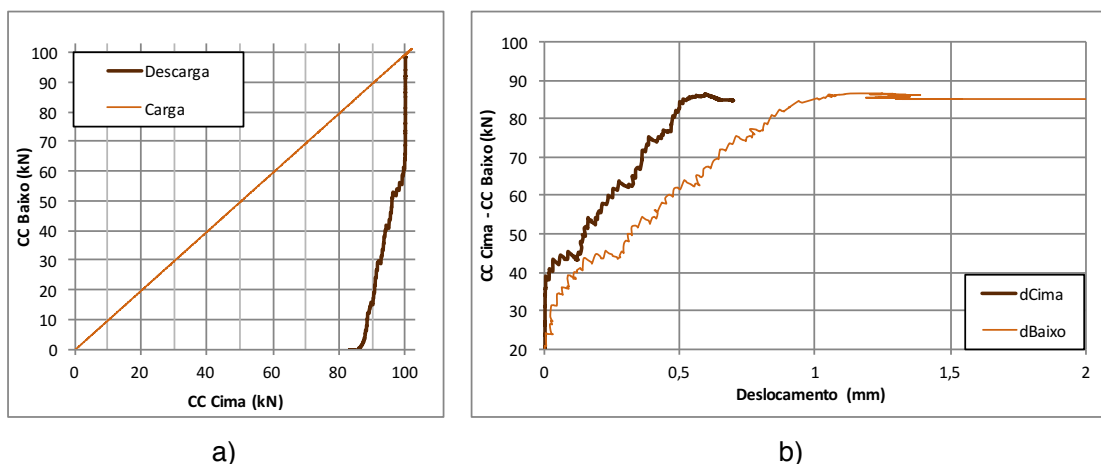
b)

**Figura 4.2 - Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço b) evolução da força medida na extremidade inferior do cordão ao longo do tempo**

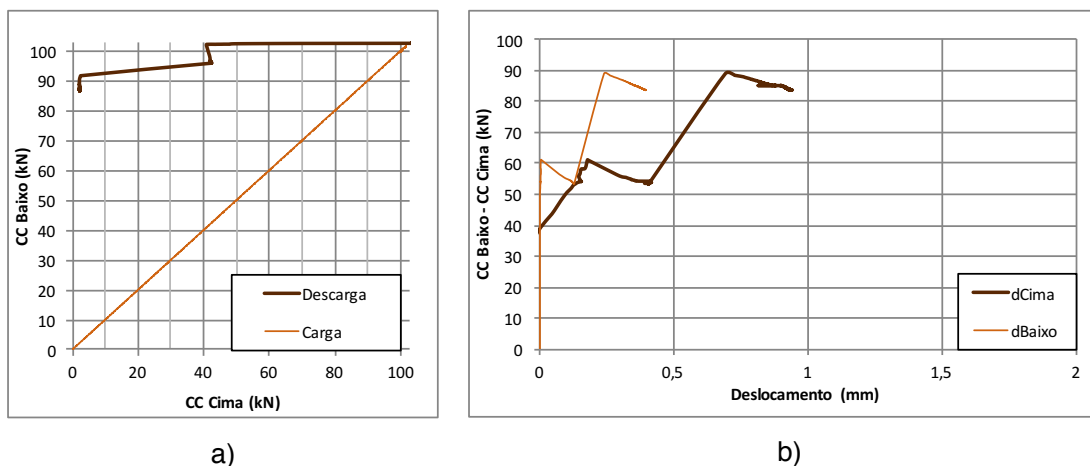
No gráfico a) da Figura 4.2, pode observar-se o instante da perda de adesão que corresponde ao início do deslocamento do cordão de pré-esforço em relação ao betão sendo que para um comprimento de amarração de 400 mm ronda os 45 kN de transferência de pré-esforço e para um comprimento de 500 mm, ronda os 57 kN. Esta perda de adesão é progressiva ao longo do comprimento de aderência.

Após a transferência do pré-esforço, a tensão aplicada e medida pela CC Cima não fica estagnada, diminuindo lentamente acompanhada de um deslocamento do cordão, como é possível verificar pelo patamar superior dos gráficos da Figura 4.2 a). O decréscimo representado nesta figura, corresponde em todos os casos, à queda de valores decorrida no período de cinco minutos.

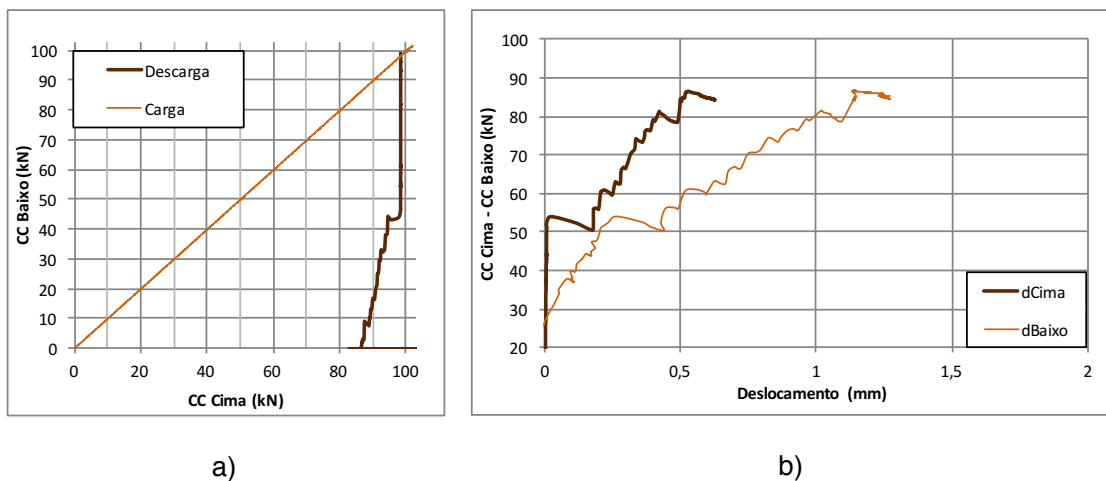
Na Figura 4.2 não se apresentam os valores referentes ao ensaio TVM4002 devido ao facto de ter ocorrido um problema com o macaco hidráulico, como referido em 4.2 . Nas Figuras 4.3 a 4.11, apresenta-se a evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima e a evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço, para cada um dos ensaios realizados.



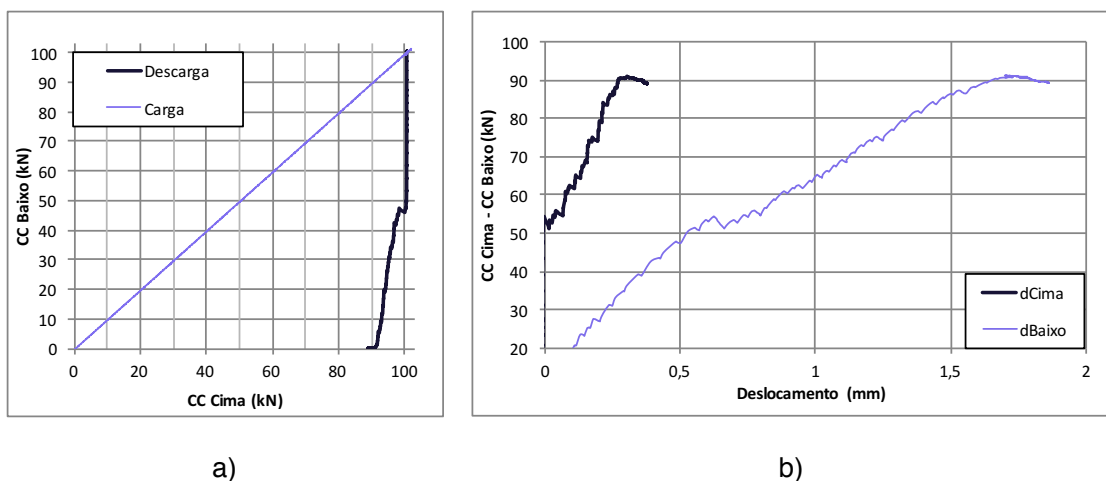
**Figura 4.3 – TVM4001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



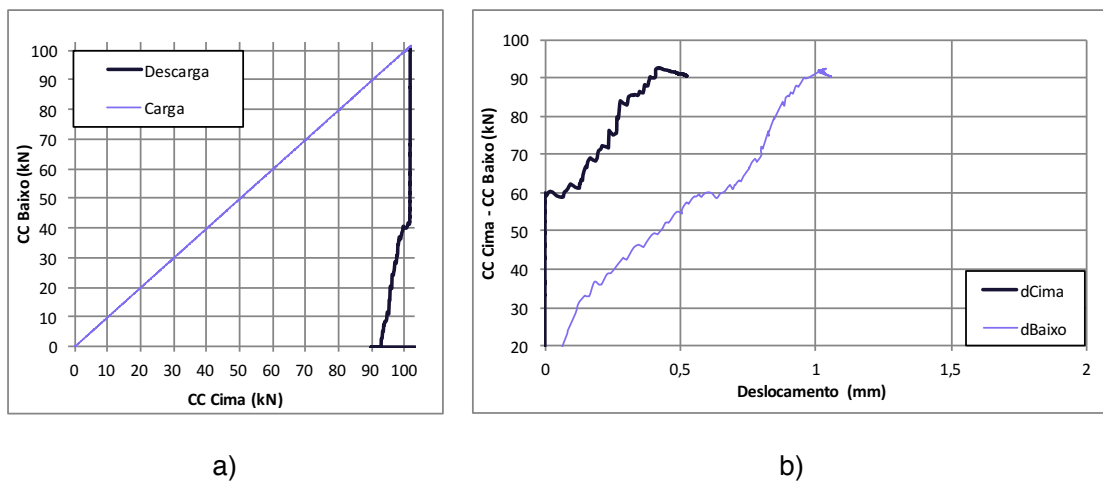
**Figura 4.4 – TVM4002 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



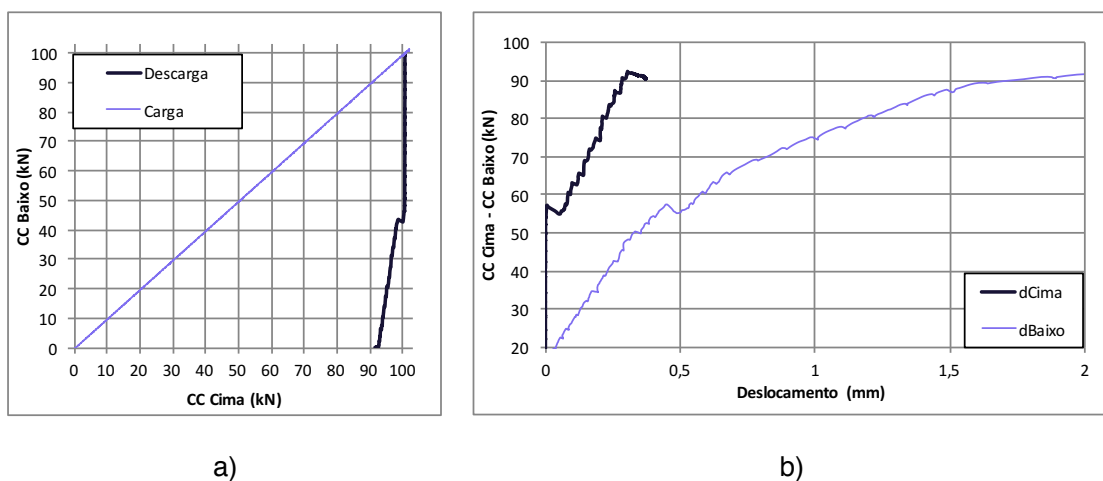
**Figura 4.5 – TVM4003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



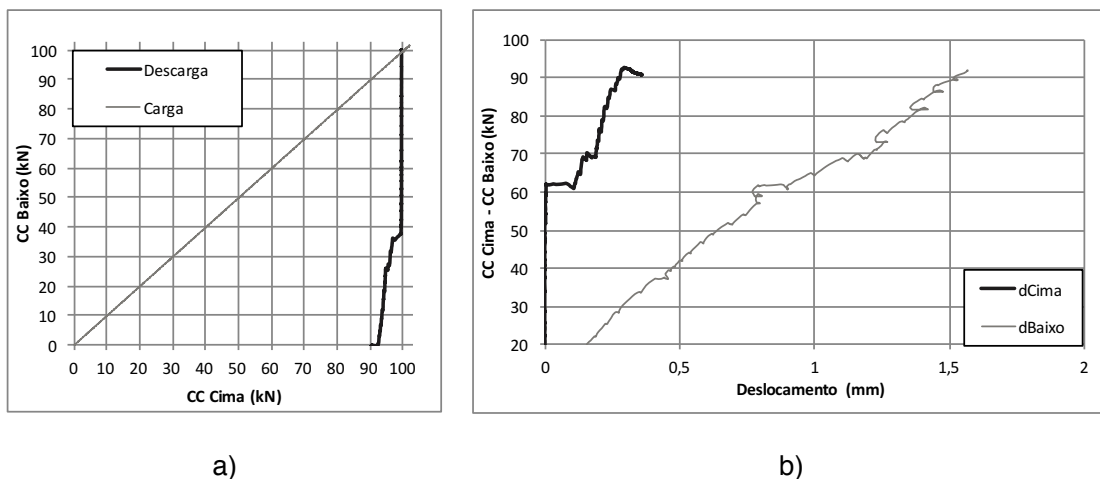
**Figura 4.6 – TVM5001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



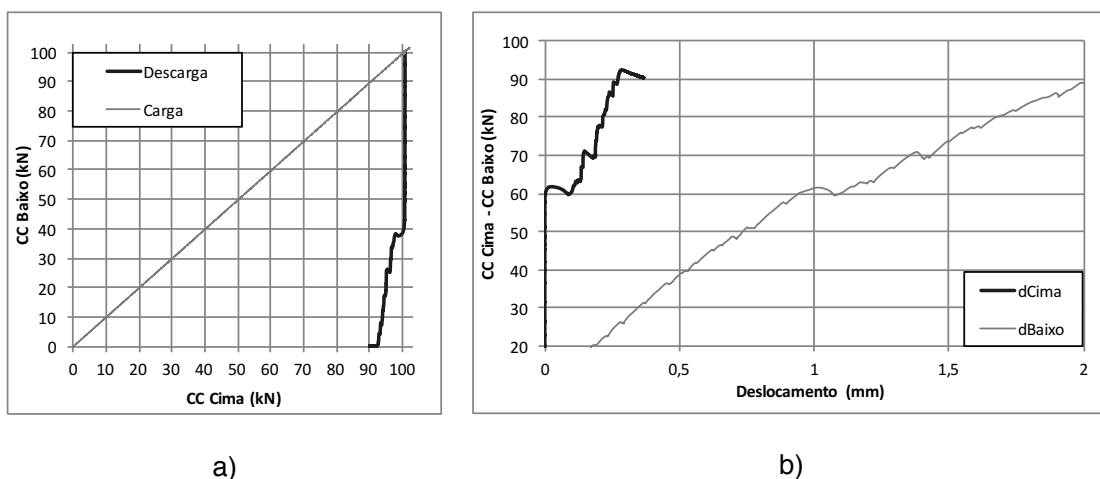
**Figura 4.7 – TVM5002 a) a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



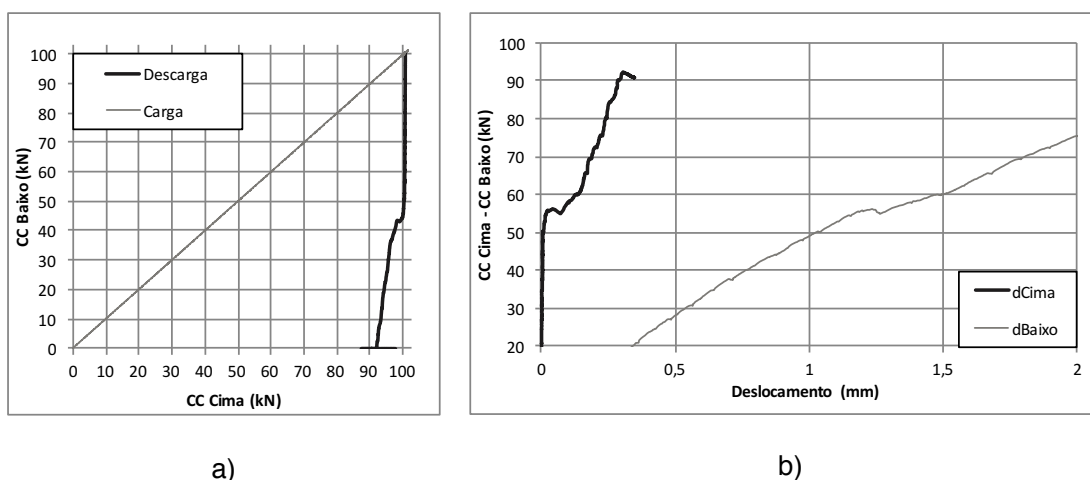
**Figura 4.8 – TVM5003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



**Figura 4.9 – TVC5001 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



**Figura 4.10 – TVC5002 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**



**Figura 4.11 – TVC5003 a) Evolução da força medida na célula de carga de baixo com a célula de carga de cima b) Evolução do diferencial entre a força medida nas extremidades superior e inferior do cordão com o deslocamento durante a transferência do pré-esforço**

Também nestes gráficos é possível identificar o instante da perda de aderência comparando o deslocamento do cordão em cima e em baixo nos gráficos da Figura 4.3 b) à Figura 4.11 b). Aqui observa-se que o instante em que o cordão inicia o deslocamento na extremidade inferior da resina se verifica antes do deslocamento na extremidade superior. Note-se também que o valor final de CC Cima-CC Baixo é diferente de 100 kN. Isto acontece, pois, o valor final medido pela CC Cima é diferente de 100 kN, sendo que para um comprimento de amarração de 400 mm desce aproximadamente para 85 kN, correspondendo a 15 % de perdas e para um comprimento de amarração de 500 mm desce aproximadamente para 90 kN correspondendo a 10 % de perdas. Estes valores estão descritos com maior rigor na Tabela 4.1 referente aos resultados dos ensaios de transferência de pré-esforço.

A Figura 4.4 referente ao ensaio TVM4002 mostra, ao contrário das outras figuras, a libertação do macaco hidráulico superior de modo repentino. Isto porque esta libertação foi feita antes de se aliviar o macaco mecânico e sendo assim, os gráficos desta figura servem como comparação entre um ensaio de transferência do pré-esforço repentino e lento. Esta transferência de pré-esforço repentina, como é possível verificar na figura, foi feita em duas fases.

A Tabela 4.1 apresenta os valores após a transferência completa do pré-esforço onde, dCima e dBaixo representam o deslizamento em cima e em baixo respetivamente e a Força corresponde à força medida na célula de carga de cima.

Os valores do deslizamento em cima (dCima) terão correspondência com a perda de pré-esforço e são maiores nos comprimentos de aderência de 400 mm (0,75 mm) do que nos



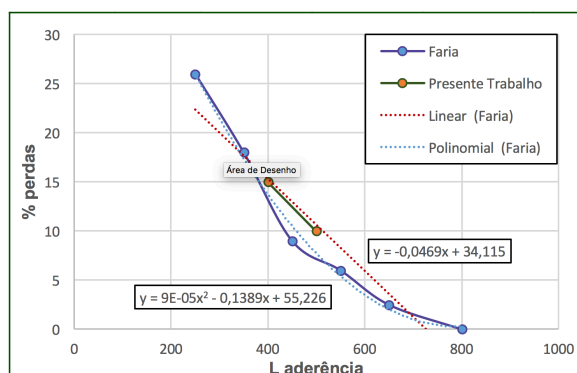
de 500 mm (0,40 mm). Os valores do deslizamento em baixo (dBaixo) correspondem à re-entrada do cordão na zona de aderência e têm valores médios de 2,25 mm nos comprimentos de aderência de 400 mm e de 1,79 mm nos comprimentos de aderência de 500 mm. Quanto às perdas de pré-esforço, elas são maiores nos comprimentos de aderência de 400 mm (14,7 %) do que nos de 500 mm (9,8 %). A tensão de aderência média na transmissão do pré-esforço, admitindo que esta é uniforme em todo o comprimento aderente (400 mm ou 500 mm), é superior nos comprimentos aderentes de 400 mm (4,3 MPa) do que nos comprimentos aderentes de 500 mm (3,7 MPa).

**Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de transferência de pré-esforço**

Ensaio	dCima [mm]	dBaixo [mm]	Força [kN]	Perda de pré-esf. [%]	Tensão [MPa]
TVM4001	0,70	3,20	84,8	15,2	4.3
TVM4002	-	-	86,7	13,3	
TVM4003	0,63	1,29	84,4	15,5	
TVM5001	0,38	1,90	89,2	10,8	3.7
TVM5002	0,52	1,05	90,5	9,5	
TVM5003	0,37	2,43	90,5	9,5	
TVC5001	0,36	0,40	90,6	9,4	3.7
TVC5002	0,37	1,14	90,3	9,7	
TVC5003	0,37	3,05	90,1	9,9	

Faria [16] realizou ensaios de transferência do pré-esforço semelhantes aos do presente trabalho mas com um pré-esforço inicial de, aproximadamente, 170 kN. No presente trabalho foi utilizada uma força de pré-esforço de 100 kN. Os valores obtidos nos ensaios experimentais para as perdas após a transferência de pré-esforço foram comparados e podem ser avaliados na Figura 4.12.

Presente Trabalho		Faria	
L aderencia	% perdas	L aderência	% perdas
400	15	250	26
500	10	350	18
		450	9
		550	6
		650	2,5
		800	0



**Figura 4.12 Comparação das perdas com o trabalho de Faria [16]**

Aqui verifica-se uma grande semelhança nos resultados. Se se fizer uma regressão linear do desenvolvimento das perdas com o aumento do comprimento de amarração para os resultados de Faria, observa-se que estes valores praticamente coincidem com os valores obtidos para os ensaios experimentais do presente trabalho. Dado que os ensaios apenas envolvem dois comprimentos de amarração não é possível verificar se o andamento é linear ou mais próximo de uma função polinomial. Sendo assim, pode apenas supor-se que as perdas ou diminuem ou se mantêm com o aumento da força de pré-esforço aplicada inicialmente, mas nunca aumentam. Para o estabelecimento desta hipótese assumiu-se que as resinas utilizadas nos dois trabalhos não têm características muito diferentes.

## **4.5 Ensaios de arrancamento (*pull-out*)**

No instante imediatamente anterior ao início dos ensaios de arrancamento, o macaco mecânico inferior encontrava-se totalmente inativo, mas com a cunha ainda presa. Foi deixada uma folga no macaco de aproximadamente 15 mm para permitir o deslizamento do cordão em caso de rotura, mas não permitir o arremesso deste, visto que o teste foi feito com controlo por força e esta situação seria, portanto, possível e perigosa. Optou-se por fazer a aplicação da força a uma velocidade de 0,085 kN/s.

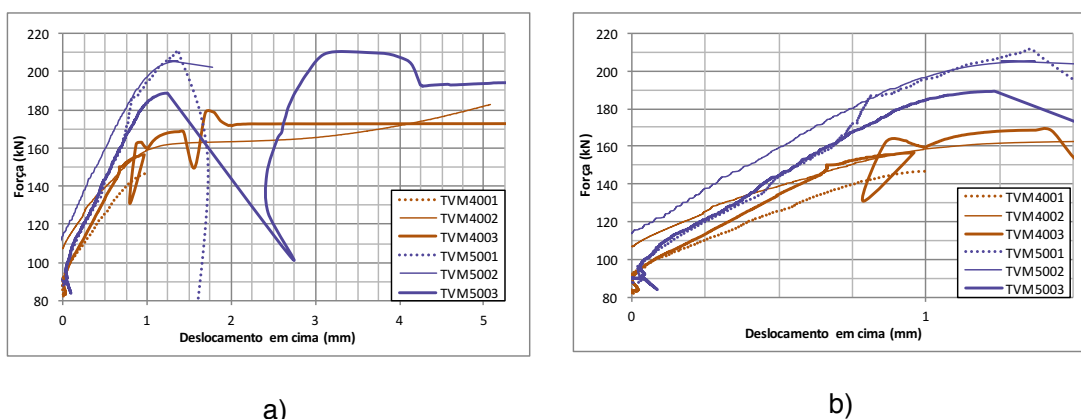
No início foi necessário aguardar que a força no macaco hidráulico atingisse a força instalada no cordão. A partir do momento em que este ponto é ultrapassado, a força medida pela CC Cima começa a aumentar, no caso dos ensaios monotónicos até à rotura. O desenvolvimento de todos os ensaios apresenta-se nos gráficos força-deslocamento na Figura 4.13 e o desenvolvimento de cada um individualmente, apresenta-se na Figura 4.14 à Figura 4.22. Nestes gráficos, estão incluídos os ensaios de arrancamento feitos nos ensaios cíclicos após estes terem perdido mais de 50 % da força de pré-esforço. Nos gráficos da direita, foram retirados os valores após rotura para simplificar a observação.

No caso do ensaio TVM4003, apenas para a primeira figura, de modo a simplificar a visualização do gráfico, foi retirado o primeiro salto de valores pois não implicou deslocamento na zona superior da aderência, apenas na zona inferior como se pode observar na Figura 4.16 estando, portanto, a força de pré-esforço aplicada foi preservada. O segundo salto deste mesmo gráfico foi assumido como a rotura neste ensaio.

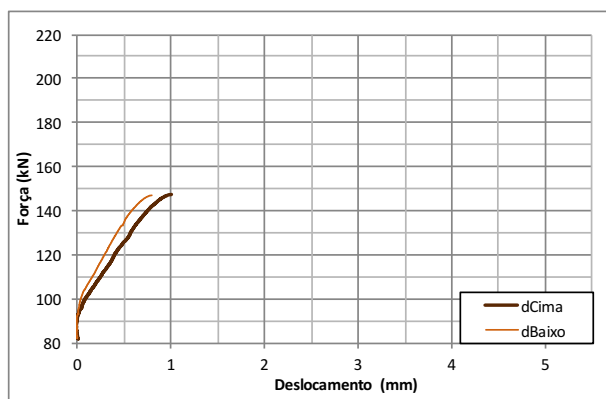
Note-se que, como referido na secção 4.2 o Ensaio TVM4002, o TVM4003 e o TVM5003 tiveram uma rotura plástica, sendo que no TVM4003 e no TVM5003 o patamar de plastificação foi de tal ordem que não foi representado na totalidade no gráfico da Figura 4.13 a).

Os valores após o início do patamar de plastificação podem ser contabilizados para um caso de avaliação do sistema proposto para resistência aos estados limite últimos. O pré-esforço é muitas vezes utilizado como controle de deformação, logo, é importante para o caso em estudo, atingir o mínimo de deslizamento possível.

Foi referido na secção 4.2 que os ensaios que tiveram uma rotura plástica coincidiram com os ensaios que tiveram descarregamentos repentinos. É deste modo importante controlar este tipo de circunstâncias para impedir situações de grande deslizamento do cordão que será num caso real acompanhado da deformação do elemento estrutural reforçado.



**Figura 4.13 – a) Gráficos força-deslocamento para os ensaios monotônicos à rotura, b) escala aumentada**



**Figura 4.14 – Ensaio TVM4001, relação força-deslocamento**

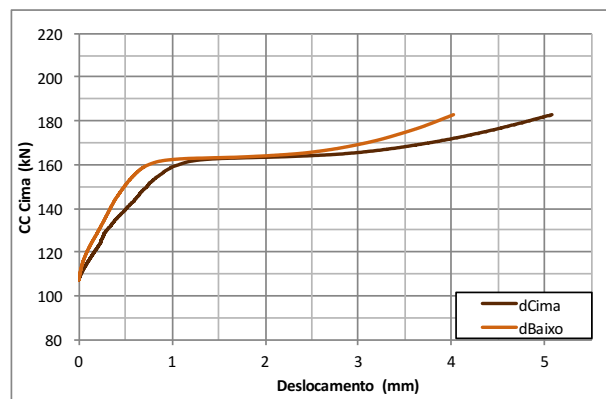


Figura 4.15 – Ensaio TVM4002, relação força-deslocamento

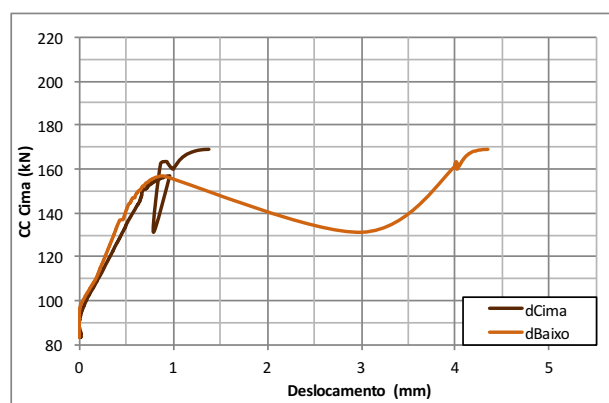


Figura 4.16 – Ensaio TVM4003, relação força-deslocamento

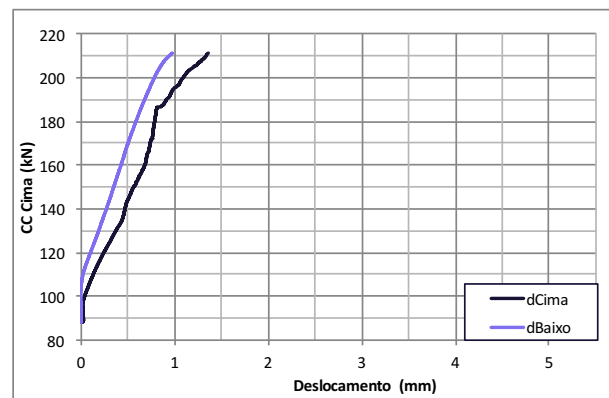
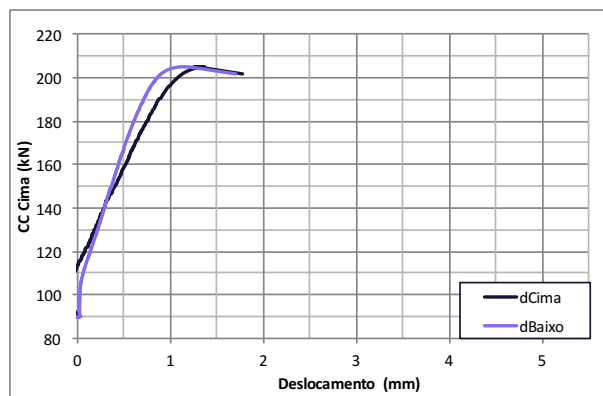
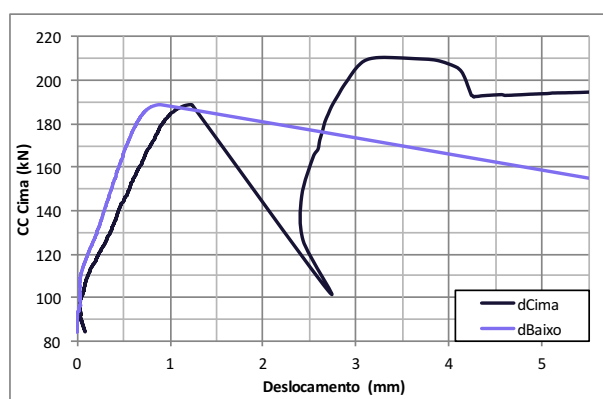


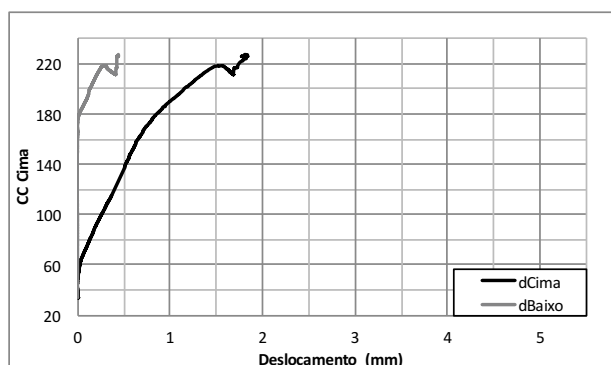
Figura 4.17 – Ensaio TVM5001, relação força-deslocamento



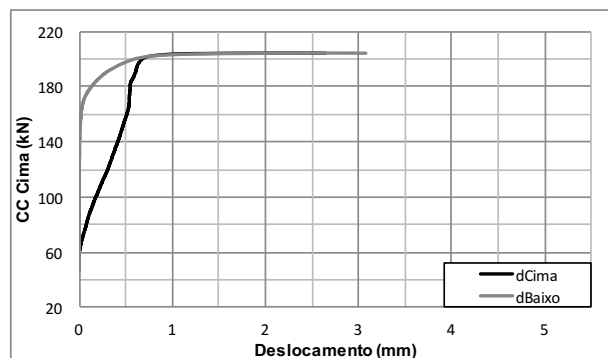
**Figura 4.18 – Ensaio TVM5002, relação força-deslocamento**



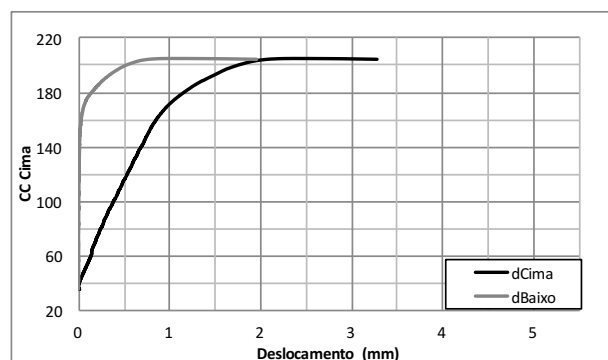
**Figura 4.19 – Ensaio TVM5003, relação força-deslocamento**



**Figura 4.20 – Ensaio TVC5001, relação força-deslocamento**



**Figura 4.21 – Ensaio TVC5002, relação força-deslocamento**



**Figura 4.22 – Ensaio TVC5003, relação força-deslocamento**

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores da força de rotura, e no caso dos ensaios com rotura plástica, os valores da força no momento de plastificação. Tendo em conta que a diferença foi tão significativa, notando que o valor da força última média para os ensaios com 400 mm de comprimento de aderência foi 78 % do valor dos outros ensaios, optou-se por realizar os ensaios cíclicos com um comprimento de amarração de 500mm de comprimento. Note-se que 400 mm é 80 % de 500 mm, logo, a proporção entre a força de rotura e o comprimento de aderência é praticamente direta.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores na rotura:  $d_u$  é o deslizamento em cima na rotura e foi tarado após a transferência do pré-esforço, e no caso dos ensaios cíclicos foi tarado no momento em que depois do último ciclo foi atingida a força de 90 kN de modo a comparar estes valores com os ensaios monotônicos;  $F_u$  é a força máxima;  $d_{u2}$  corresponde ao deslocamento no final do patamar de plastificação;  $F_{u2}$  é a força no final do patamar de plastificação.

**Tabela 4.2 - Valores principais dos ensaios de arrancamento**

Ensaio	$d_u$ [mm]		$F_u$ [kN]		Tensão [MPa]	$d_{u2}$ [mm]		$F_{u2}$ [kN]		Tensão [MPa]
TVM4001	1,00	1,08	147,0	158,0	8.0	-	-	-	168,7	8.6
TVM4002	1,05		159,3			5,08		182,35		
TVM4003	1,18		167,7			24,86		176,88		
TVM5001	1,32	1,28	211,6	202,0	8.2	-	-	-	207,4	8.4
TVM5002	1,27		205,4			-		-		
TVM5003	1,24		188,8			17,92		205,20		
TVC5001	1,28	1,27	217,1	204,2	8.3	1,92	2,88	227,04	211,6	8.6
TVC5002	0,53		198,6			4,45		202,37		
TVC5003	1,26		197,0			2,27		205,03		

Pela análise da Tabela 4.2, pode observar-se que o valor da força máxima não é afetado pelos ciclos visto que este valor médio não varia muito dos ensaios cíclicos para os ensaios monotónicos com comprimento de aderência de 500 mm. Este é um fator que confere uma grande segurança em relação ao sistema proposto pois mostra que após a ocorrência do sismo, a eficácia em relação aos estados limite últimos permanece inalterada. É importante salientar que, o facto de ter havido desperdícios de resina no ensaio TVM4001, assim como referido na secção 4.2, provocou uma descida dos valores da força máxima para 90% da média dos outros valores para o mesmo comprimento. Posto isto, é importante ter atenção ao momento de injeção e fazer o possível para não haver desperdícios.

#### 4.5.1 Rotura

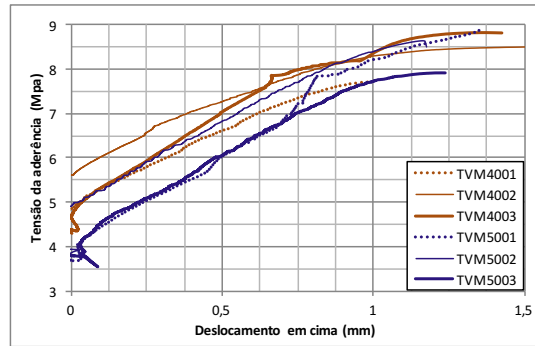
Durante os ensaios, através das marcas angulares dos discos onde batem os defletómetros, verificou-se que o cordão tende a desenrolar ligeiramente à medida que a força aplicada aumenta. Após a rotura, nos ensaios que apresentaram rotura plástica observou-se que, após o início do patamar de plastificação ser atingido, a rotação do cordão dá-se em sentido contrario. Isto acontece porque a interface onde o deslizamento do cordão se dá é a interface aço-resina. Esta conclusão assenta no facto de o molde feito pela resina à volta do cordão, obrigar o cordão a deslizar ao longo do andamento dos fios e não ao longo eixo do cordão.

#### **4.5.2 Tensão de aderência**

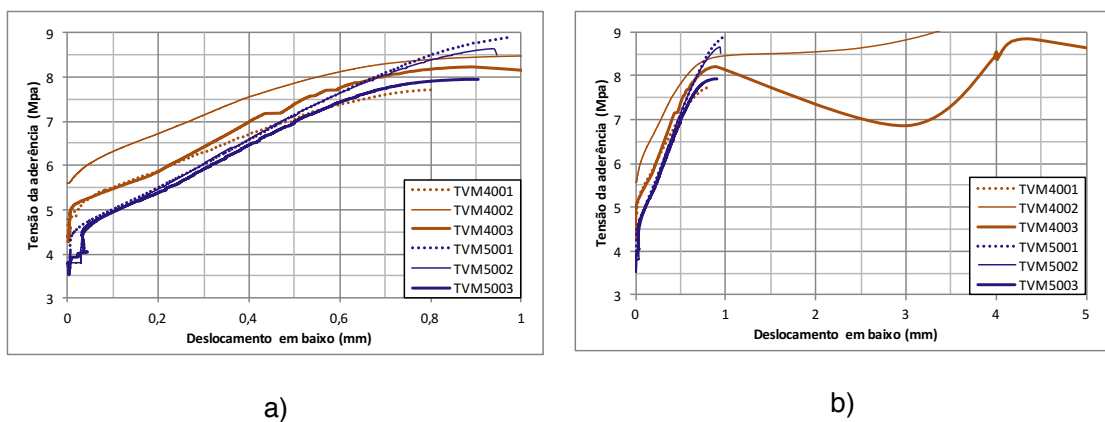
Para avaliar os ensaios em termos da tensão de aderência, foi utilizada a equação (2.5) para relacionar a força com a tensão. Para a mesma força aplicada, a tensão aplicada na ligação de 400 mm de comprimento é maior do que a tensão aplicada em 500 mm de comprimento. Posto isto, torna-se evidente que a tensão de aderência na rotura deverá ser a mesma para os dois comprimentos de selagem, considerando que a relação entre o comprimento de aderência e a tensão de rotura é linear.

Na Figura 4.23 e na Figura 4.24, estão representados os gráficos que relacionam a tensão de aderência com o deslocamento do cordão em cima e em baixo respetivamente. Na Figura 4.24 b), alterou-se a escala do gráfico de modo a ser possível visualizar todo o desenvolvimento de alguns ensaios que apresentam um maior deslocamento do cordão. Com a exceção dos ensaios TVM4001 e TVM5003, a tensão de aderência na rotura não difere muito nos seus valores como era expectável, rondando uma tensão de 8,75 MPa no final do ensaio. A perda de tensão aderente no ensaio TVM4001 está justificada no capítulo 4.2. Apesar das condições expostas no capítulo 2.5.1.1 dizerem respeito a ensaios de arrancamento sem serem precedidos de um ensaio de transferência do pré-esforço, pode fazer-se um paralelismo com o caso presente. A condição da equação (2.2) descrita por [22] assegura que para o comprimento de selagem de 400 mm se pode adotar um modelo uniforme de tensões, dado que o diâmetro nominal do cordão utilizado é de 15,7 mm. O mesmo não acontece para um comprimento de 500 mm. Todavia, uma vez que, como se verifica na Figura 4.23, a tensão de rotura se manteve para os dois comprimentos, pode assegurar-se que a aproximação a um modelo uniforme continua a ser viável para esta ordem de comprimentos. Esta discordância em relação às condições da literatura referida pode dever-se ao pré-esforço aplicado. Assim sendo, observou-se uma subida de 27 % do limite do regime elástico na aderência de um cordão ao betão. A subida observada pode ser ainda superior ao valor dado visto que o limite elástico não foi atingido, logo, é provável que com um aumento do comprimento de selagem, o regime uniforme continue a reger esta ligação.



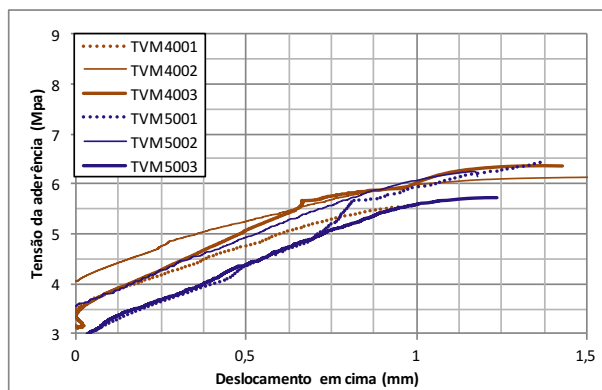


**Figura 4.23 – Relação tensão de aderência-deslocamento em cima para os ensaios de arrancamento monotônicos**



**Figura 4.24 – Relação tensão de aderência-deslocamento em baixo para os ensaios de arrancamento monotônicos**

É importante definir com rigor a área de contacto onde o atrito e a ação mecânica da resina atuam para prender o cordão. Na secção 2.5.1.3, é explicado o porquê desta área ser menor do que a área externa do cordão na zona de aderência. Na Figura 4.25 é possível verificar, comparando com a Figura 4.23, que a mudança da área resulta numa alteração drástica nas tensões de aderência. Assim sendo, e uma vez que a alteração do perímetro do da secção do cordão onde atua o atrito não tem um rigor matemático, no presente trabalho dá-se preferência aos dados em função da força em detrimento dos da tensão de aderência.



**Figura 4.25 - Tensão de aderência-deslocamento do cordão sem alteração da área de contacto**

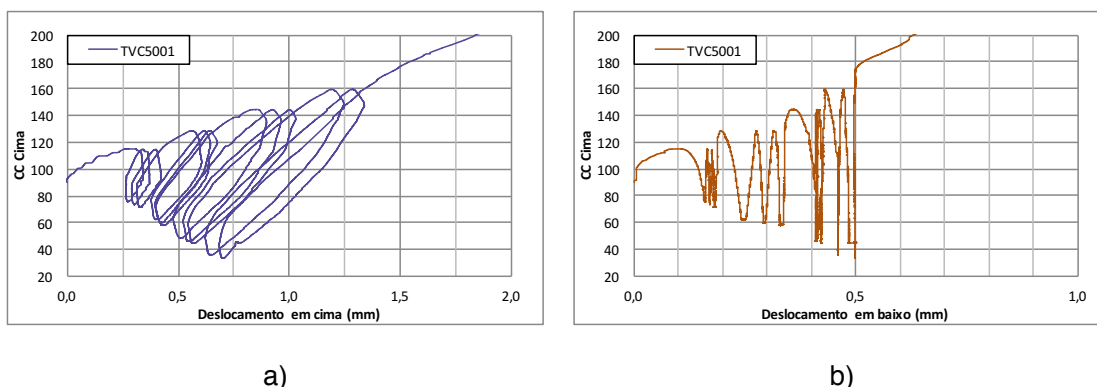
## 4.6 Ensaios cíclicos

Assim como nos ensaios monotônicos, a velocidade da solicitação nos ensaios cíclicos foi de 0,085 kN/s e como referido anteriormente, o comprimento de amarração foi de 500 mm. Foram realizados três ciclos com a variação da força aplicada no macaco hidráulico superior entre 115 kN e o mínimo da força residual de pré-esforço. Seguidamente repetiu-se o processo para uma força 15 kN superior e assim sucessivamente até as perdas de pré-esforço serem superiores a 50 %. A história de carga imposta está representada na Figura 4.26 Após este patamar ser ultrapassado foi feito um ensaio de arrancamento tal como nos ensaios monotônicos. Os ensaios de transferência do pré-esforço e de arrancamento após as perdas da força residual de pré-esforço superiores a 50 % foram já mostrados na secção 4.4

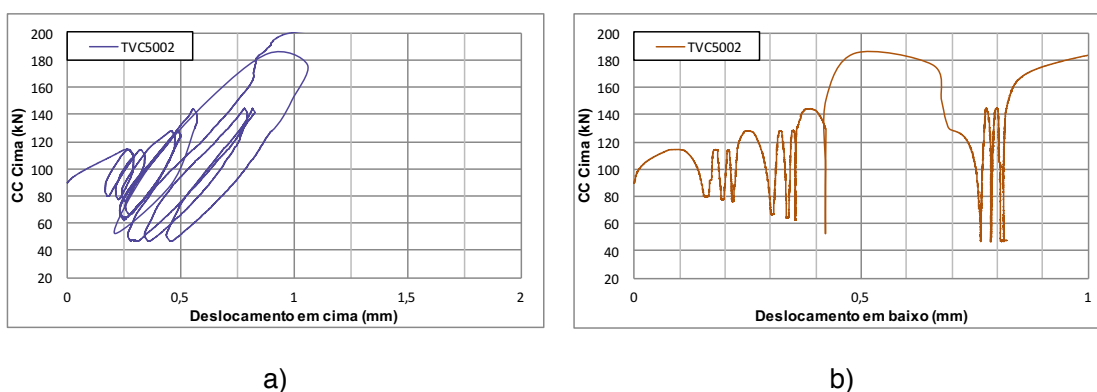


**Figura 4.26 – História de carga imposta no carregamento cíclico do ensaio de arrancamento**

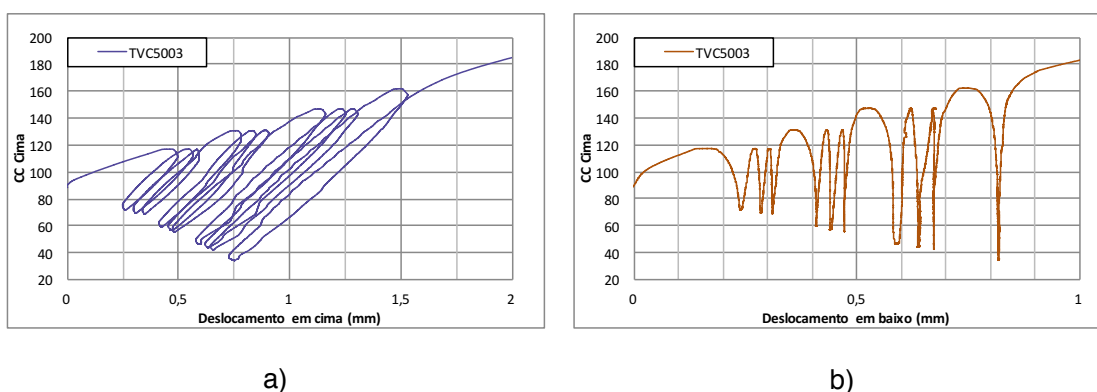
Os gráficos força-deslocamento dos ensaios cíclicos apresentam-se nas seguintes figuras:



**Figura 4.27 – Ensaio TVC5001 a) Relação força-deslocamento em cima, b) Relação força-deslocamento em baixo**



**Figura 4.28 – Ensaio TVC5002 a) Relação força-deslocamento em cima, b) Relação força-deslocamento em baixo**



**Figura 4.29 – Ensaio TVC5003 a) Relação força-deslocamento em cima, b) Relação força-deslocamento em baixo**

Podem ser observadas nos gráficos dos ensaios cíclicos algumas particularidades. As singularidades referidas na secção 4.2 resultaram na falta de coerência na leitura do gráfico da Figura 4.28 a) e na irregularidade no desenvolvimento do gráfico da Figura 4.27 b). Assim

como referido na mesma secção, o salto nos valores dos gráficos da Figura 4.28, foi devido a uma falha da bomba hidráulica que aplicou repentinamente uma força elevada e voltou a baixar imediatamente a seguir, resultando num deslizamento brusco do cordão.

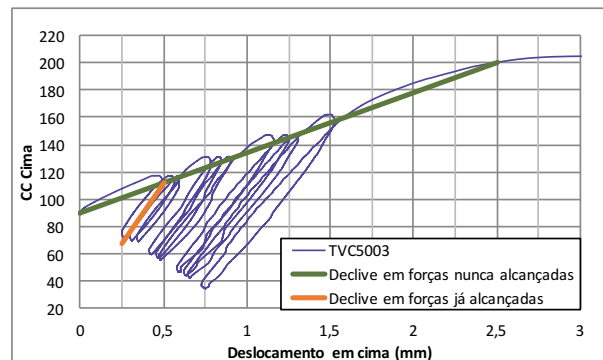
Para além destes pormenores, é possível verificar nos gráficos do ensaio TVC5001 que a rigidez da resina diminui ao longo do ensaio. Esta diminuição resulta no decréscimo do declive do gráfico ao longo dos ciclos.

Em todos os ensaios, tanto em relação ao deslocamento em cima como em relação ao deslocamento em baixo, é possível conferir que a energia de deformação é maior quando a força do macaco hidráulico superior ultrapassa valores nunca antes atingidos. Esta energia corresponde ao integral do gráfico força-deslocamento (área abaixo da linha do gráfico).

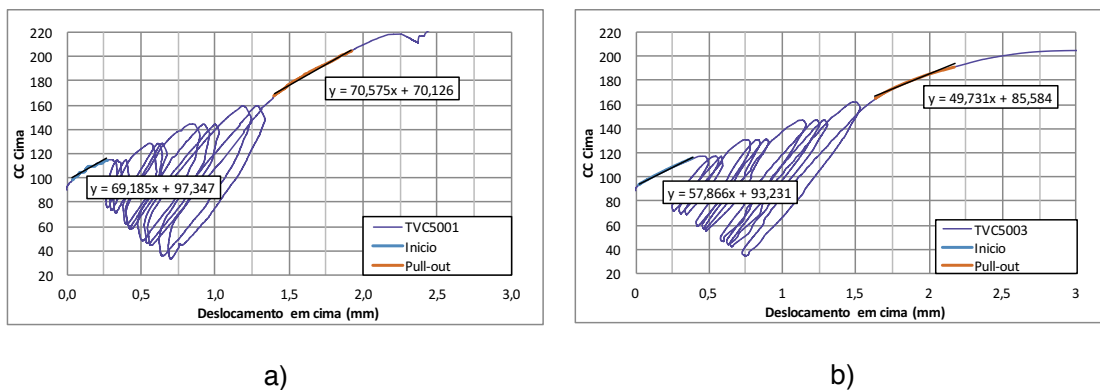
Em relação ao deslocamento do cordão em baixo, o fenómeno da energia de deformação referido anteriormente demonstra que quando o valor da força no macaco hidráulico se situa abaixo do máximo valor alguma vez imposto, o deslocamento do cordão é reduzido.

Em relação ao deslocamento do cordão em cima, este fenómeno pode ser também verificado, mas existem outros pormenores presentes importantes de referir. Apesar de apenas o TVC5001 mostrar claramente o decréscimo da rigidez da ligação com a resina, crê-se que este fenómeno possa estar presente em ensaios futuros. Sendo assim, esta é uma situação mais gravosa do que outra em que isto não aconteça, logo, é conservativo assumir que a rigidez diminui. Mesmo adotando esta situação como um facto, verifica-se que o declive dos gráficos dos ensaios cíclicos é sempre maior durante os ciclos, em zonas onde a força atuante já foi atingida no passado, do que durante o arrancamento ou no primeiro ciclo de cada incremento de carga. Isto pode ser verificado pela análise dos gráficos da Figura 4.30. A força máxima de arrancamento não é afetada pelos ciclos, como se pode comprovar pela análise da Tabela 4.1, portanto, o comportamento da resina é melhor se a força atuante num estado normal de utilização não for a força máxima alguma vez imposta. Isto pode também ser confirmado pela observação dos gráficos dos ensaios de arrancamento dos ensaios cíclicos na Figura 4.20 à Figura 4.22. Aqui verifica-se claramente que o declive do gráfico diminui quando o valor da força ultrapassa o máximo atingido durante os ciclos, ou dito de outro modo, a rigidez diminui. Apesar disto, após a força máxima atingida nos ciclos ser ultrapassada, o declive do gráfico força-deslocamento diminui, mas, como a Figura 4.31 demonstra, esta diminuição do declive acontece apenas até este igualar a inclinação do gráfico no início da solicitação. Sendo assim, nunca se perde rigidez, mesmo fazendo um balanço entre a zona de rigidez elevada (durante os ciclos) e a zona de rigidez reduzida

(aplicação de uma força nunca antes ultrapassada). Na secção 5.3 propõe-se um sistema de pré-esforço que faz uso desta característica.



**Figura 4.30 - Comparação dos declives em zonas de força nunca antes alcançada e em zonas de forças já alcançadas anteriormente (da envolvente e dos ciclos)**



**Figura 4.31 – Comparação dos declives no início da solicitação e no final dos ciclos, a) TVC5001, b) TVC5003**

## 4.7 Carotes dos furos

De modo a confirmar algumas suposições que foram feitas durante os ensaios anteriormente descritos, foram retirados carotes dos furos ensaiados. Após retirados estes carotes, foram feitos cortes longitudinalmente com o intuito de visualizar o estado da ligação. Foram várias as confirmações com esta análise. A primeira, e mais importante, foi a confirmação de que a perda de adesão acontece na ligação aço-resina e não betão-resina como pode ser confirmado na Figura 4.32 pelo desprendimento dos dois materiais na interface referida.



**Figura 4.32 - Resultado do corte de um carote do furo**

A segunda confirmação retirada desta análise, que foi referida inicialmente no capítulo 4.2, foi a perda de resina no ensaio TVM4001 devido ao fluxo da mesma pela falta do uso da plasticina na zona onde a aderência não é pretendida. Este fenómeno pode ser confirmado pela clara diferença entre a quantidade de vazios de resina na Figura 4.33.

A terceira, foi a confirmação de que, apesar de nos ensaios aos prismas de dimensões 40x40x160 mm<sup>3</sup> resultarem em blocos pouco homogéneos, devido à cura acentuadamente exotérmica, e de nos ensaios do tubo de vidro referidos no capítulo 4.3 existirem vazios com dimensões superiores a um centímetro quadrado, no caso real de aplicação num furo de betão com o cordão de pré-esforço, a cura da resina resultou num espalhamento homogéneo da mesma com vazios de dimensões pouco maiores do que um milímetro quadrado. Isto pode dever-se ao facto de a capacidade térmica mássica do betão ser superior à da cofragem metálica dos provetes e à do tubo de vidro, impedindo assim um aumento da temperatura da resina aquando da cura impedindo que atinja temperaturas excessivas. Isto resulta numa porosidade e porometria menores. Foi também confirmado que, assim como sugere a secção 2.5.1.3, a rotura na resina não se dá exatamente pelo perímetro externo do cordão. Isto resulta, como já foi referido, numa área de contacto menor devido à resina partir antes da interseção dos vários fios do cordão. Na Figura 4.34, pode observar-se este fenómeno devido ao molde resultante da fratura do carote não formar uma aresta angulosa na interceção com o cordão.



a)



b)

**Figura 4.33 – a) Estado da resina no ensaio TVM4001, b) estado da resina no ensaio TVM5001**



**Figura 4.34 - Forma da resina após a perda de aderência**





## **5 CONCLUSÕES**

### **5.1 Introdução**

No presente capítulo pretende-se sintetizar as deduções e conclusões do estudo feito para avaliar o comportamento mecânico do sistema de ancoragem de cordões de pré-esforço por aderência com recurso a uma resina epoxídica.

### **5.2 Conclusões**

Verificou-se que entre o comprimento de 400 mm e o comprimento de 500mm de selagem do cordão, existe uma relação de proporcionalidade direta entre este comprimento e a força de rotura do sistema.

A rotura do sistema com o comprimento de selagem de 400 mm acontece com forças da ordem dos 160 kN e para comprimentos de 500 mm supera os 200 kN. Para os mesmos comprimentos de embebedimento, após a transferência do pré-esforço houve uma perda de 15 % e 10 % da força de pré-esforço respetivamente. Deste modo, torna-se evidente que com um comprimento de selagem maior, ocorrem menos perdas de pré-esforço.

Nos ensaios cíclicos, observou-se que a energia de deformação do sistema é maior no primeiro ciclo de cada incremento de carga do que nos restantes ciclos do mesmo incremento de carga. Esta energia, quando medida em relação ao deslocamento do cordão na zona inferior e para este tipo de situações, é praticamente nula.

O conhecimento sobre a montagem do mecanismo resistente evoluiu. Foi possível verificar quais são os fatores mais condicionantes no comportamento da ancoragem e seguidamente são propostas algumas experiências laboratoriais.

## **5.3 Desenvolvimentos futuros**

É importante impedir o fluxo da resina ao longo das zonas não aderentes para não haver desperdícios que diminuam a área de contacto entre o aço e a resina, podendo a força última do sistema de ensaio diminuir para 90 % dos valores pretendidos.

É também importante ser cauteloso na montagem dos defletómetros e nos seus apoios destes. Para as forças presentes num ensaio deste tipo existem sempre deformações subjacentes que podem alterar e confundir os resultados.

O objetivo da investigação realizada neste trabalho foi aumentar o conhecimento sobre este tipo de ligação para no futuro reforçar estruturas com o sistema proposto. Em vez de ancorar apenas com a resina as extremidades do cordão, sugere-se ancorar com resina com um comprimento menor e adicionar uma chapa presa com um cilindro, aplicando uma tensão localizada no betão. Isto seria possível porque se faria a aplicação do pré-esforço do lado contrário à chapa. Para esta força não ser excessiva, causando esmagamento do betão, assim que a chapa toca no betão, seria contabilizada a força aumentada a partir desse instante e ainda durante a aplicação do pré-esforço e essa mesma força seria aplicada no macaco do outro lado de modo a anular a força da chapa no betão, mas, deixando-a encostada a este. Assim, após a injeção e a cura, a chapa estaria lá sem fazer força, mas assim que houvesse um deslocamento, esta chapa iria impedi-lo aumentando consequentemente a tensão de rotura da ligação do lado em questão do cordão.

Devido ao facto de a perda de pré-esforço resultar do deslizamento do cordão, sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam utilizadas barras de pré-esforço em vez de cordões para fazer melhor uso da ação mecânica na aderência entre o aço e a resina. Isto porque as barras têm nervuras que ajudam neste fenómeno físico.

Assim como foi referido na secção 4.6 , nos ensaios de arrancamento cíclico a rigidez da ligação é maior no primeiro ciclo de cada incremento de carga do que nos restantes ciclos do mesmo incremento de carga. Para fazer uso deste fenómeno, sugere-se, no futuro, ensaiar elementos estruturais reforçados com o sistema proposto com algumas alterações. Aplicar a resina inicialmente apenas de um lado do elemento estrutural reforçado sendo que até aqui tido será processado normalmente. Após a injeção da resina deste lado do cordão será aplicada uma força que se saiba que seja abaixo da força última da ligação e voltar a baixar a força até à força de pré-esforço ideal. Após esta fase completa, pode-se aplicar a resina do outro lado do cordão e proceder normalmente daí em diante. Com estas altera-

ções, ganha-se rigidez num dos lados da ligação do pré-esforço. Futuramente irão ser ensaiados no laboratório de estruturas da FCT-UNL sistemas equivalentes aos realizados no presente trabalho mas experimentando diferentes comprimentos de amarração e diferentes forças iniciais do pré-esforço. Se se concluir que uma força de pré-esforço superior causa uma força de rotura maior, poder-se-á, no sistema proposto, aumentar a força de pré-esforço no lado onde a resina é injetada primeiro e depois do processo explicado voltar a baixar para a força de pré-esforço ideal. Deste modo ganha-se os benefícios de um pré-esforço superior podendo o elemento estrutural reforçado receber apenas a força de pré-esforço definida.

Nos ensaios do presente trabalho, verificou-se que a rotura neste tipo de ligação se dá na interface aço-resina. Deste modo, propõe-se que, em trabalhos futuros, sejam efetuados ensaios de arrancamento onde não se deixa um comprimento não aderente no final da amarração. A necessidade deste comprimento não aderente é causada pela formação de um cone de betão no arrancamento do cordão, diminuindo assim o comprimento de amarração. Todavia, este cone apenas se forma quando a rotura acontece na ligação resina-betão. Não existe nenhum estudo que assegure que este fenómeno estará presente num ensaio onde a rotura se dá na interface aço-resina. Se o cone de betão não se formar nesta situação consegue-se reduzir o comprimento do furo necessário à amarração.



## Referências Bibliográficas

- [1] Heiza, K.; Nabil A.; Tayel M.; “State-of-the Art Review : Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques,” Artigo Científico, 2014.
- [2] Instituto Nacional de Propriedade Industrial nº PAT 103785; “Sistema de Pós-Tensão com Ancoragens por Aderência para Estruturas de Betão.” Patente Nacional INPI. Inventores: Universidade NOVA de Lisboa; Válder José da Guia Lúcio. Titular: Universidade NOVA de Lisboa 2009.
- [3] Calavera J.; “*Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón*”, 2º. Livro, Intemac ediciones, 2000.
- [4] A. Ramos and V. Lúcio, “Apontamentos de Estruturas de Betão Armado II - Pré-esforço- Introdução,” Apontamentos da Cadeira de Betão Armado II Capítulo 13, FCT UNL, Lisboa, 2006.
- [5] Ramos A.; Lúcio V., “Apontamentos de Estruturas de Betão Armado II - Pré-esforço- Materiais,” Apontamentos da Cadeira de Betão Armado II, FCT UNL, Lisboa, 2006.
- [6] Wang R.; Zheng S.; Zheng Y.; “Introduction to polymer matrix composites,” Relatório Científico, 2011.
- [7] Tayeh B.; Z. M.; Shihada S.; Yusuf M.; “Pull-out behavior of post installed rebar connections using chemical adhesives and cement based binders,” Artigo Científico, King Saud University, 2017.
- [8] Eligehausen R.; Cook R.; “Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors,” Artigo Científico, *Aci Struct. J.*, pp. 822–831, 2006.
- [9] Faria D.; “Bond Behaviour of Prestress Steel Strands Bonded with an Epoxy Adhesive and a Cement Grout for Slab Strengthening Purposes - Experimental Study,” Artigo Científico, 2010.
- [10] Doerr G.; Klingner R.; “Adhesive Anchors: Behavior and Spacing Requirements,” Artigo Científico, 1989.
- [11] Forero L.; “Comportamiento Adherente Diferido De Armaduras Pretensas En Hormigón,” Dissertação de Doutoramento, Universitat Politècnica de València, 2012.

- [12] Fernandes H.; “Sistemas de Ancoragem de Cordões de Aço de Alta Resistência por Aderência,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2008.
- [13] Antonio L.; Carneiro V.; Sc D; Maria A.; Jorge A.; “Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção,” Artigo Científico, 2009.
- [14] Antonio L.; “Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras,” Dissertação de Doutorado, Universidade do Rio de Janeiro, 2004.
- [15] Souza V.; Ripper T.; *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. Livro, PINI, 1998.
- [16] Faria D.; “Reforço de Lajes de Betão Armado usando Pós-Tensão com Ancoragens por Aderência,” Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2011.
- [17] Marchão C.; Appleton J.; “Apontamentos de Betão Armado e Pré-Esforçado II - Folhas de Apoio às Aulas, Modulo I Pré-Esforço,” Apontamentos da Cadeira de Betão Armado e Pré-esforçado II, IST UL, Lisboa, 2005.
- [18] IPQ (Instituto Português da Qualidade), “NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios,” 2010.
- [19] Hoyer E.; Friedrich E.; “Beitrag zur Frage der Haftspannung in Eisenbetonbauteilen,” Dissertação de Mestrado, 1939.
- [20] Oh B.; Kim E.; Kim K.; “Correct Prediction of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Structures,” Artigo Científico, 2001.
- [21] Buckner C.; “A Review of Strand Development Length for Pretensioned Concrete Members,” Artigo Científico, PCI Journal, 1995.
- [22] Cook R.; Kunz J.; Fuchs W.; Konz R.; “Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete,” Relatório técnico, Relatório Técnico, 1998.
- [23] Raju N.; “Prestressed Concrete,” Tata McGraw Hill, Nova Deli, 2007.
- [24] Liong P.; “Transfer of prestress by pretensioned wire tendons.” Dissertação de Mestrado, Custin University of Tecnology, 1993.
- [25] Cousins T.; Johnston D.; Zia P.; “Transfer and Development Length of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strands,” Artigo Científico, *PCI J.*, vol. 35, 1990.
- [26] Junior H.; “Vigas Protendidas - Estudo da Norma e Modelagem com Auxílio de Programa de Análise Comercial,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [27] Leonhardt F.; *Construções de Concreto Volume 5*, Editora In. Livro, Editora Interciência,

1979.

- [28] Gross S.; Burns N.; "Transfer and Development Length of 15,2mm (0,6in.) Diameter Prestressing Strand in High Performance Concrete: Results of the Hoblitzell-Bubkner Beam Tests," Artigo Científico, University of Texas at Austin, 1995.
- [29] Russell B.; Burns N.; "Measured Transfer Lengths of 0.5 and 0.6 in. Strands in Pretensioned Concrete," Artigo Científico, *PCI J.*, vol. 41, no. 5, 1996.
- [30] Laldji S.; "Bond Characteristics of Prestressing Strand in Grout," University of Leicester - Dissertação de Mestrado, 1987.
- [31] Martin H.; "Bond of reinforcement in reinforced concrete," Relatório Técnico, 1967.
- [32] Abrams D.; "Tests of bond between concrete and steel," Relatório Experimental, University of Illinois, 1913.
- [33] Holschemacher K.; Weiße D.; "Bond of Reinforcement in Fibre Reinforced Concrete," Relatório Científico, 2004.
- [34] Tuan C.; Yehia S.; Jongpitaksseel N.; Tadros M.; "End Zone Reinforcement for Pretensioned Concrete Girders," Artigo Científico, University of Nebraska at Omaha, 2004.
- [35] Fédération internationale du béton. Task Group 6.8, *Treatment of imperfections in precast structural elements: state-of-art report*. 2007.
- [36] Chandler, *end zones of pretensioned prestressed concrete beams*. Livro, Universidade de Melbourne, 1984.
- [37] Schupack M.; Mizuma K.; *Bond properties of high strength, low carbon bars with drawn-in helical deformation for use in pretensioning and as special normal reinforcement*. Livro, Journal Proceedings, 1979.
- [38] Zia P.; Mostafa; "development length of prestressing strands," Relatório Científico, PCI, 1977.
- [39] Hanson N.; "Influence of surface roughness of prestressing strand on bond performance," Relatório Científico, 1969.
- [40] Kaar P.; Fraugh; Mass; "influence of concrete strength on strand transfer length," Relatório Científico, 1963.
- [41] Lehr B.; "Tragverhalten von Verbunddübeln unter zentrischer Belastung im ungerissenen Beton – Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand," Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade de Stuttgart, 2003.

- [42] Zavliaris K.; Kollias S.; Speare F.; "An experimental study of adhesively bonded anchorages in concrete," Artigo Científico, Magazine of Concrete Research, no. 175, 1996.
- [43] Burtz J.; "Behavior and Design of Grouted Anchors Loaded in Tension Including Edge and Group Effects and Qualification of Engineered Grout Products," Dissertação de Mestrado, University of Florida, 2003.
- [44] Moreira G.; "Avaliação da Rigidez de Flexão de Ligações de Betão Armado Pré-Fabricado," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2016.